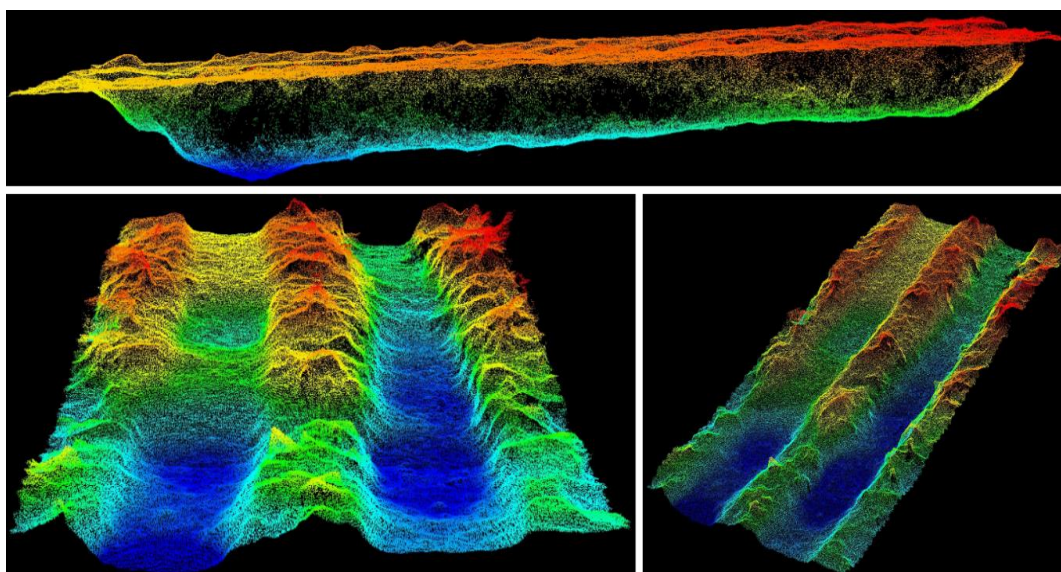


Fjärrmätning av spårdjup i skogsterräng med drönare och digital stereofotogrammetri

Remote measuring of wheel ruts depth in forest terrain with drone and digital stereophotogrammetry

Rasmus Wictorsson



Examensarbete • 30 hp

Jägmästarprogrammet

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2019:1

Umeå 2019

Fjärrmätning av spårdjup i skogsterräng med drönare och digital stereofotogrammetri.

Remote measuring of wheel ruts depth in forest terrain with drone and digital stereophotogrammetry.

Rasmus Wictorsson

Handledare: Tomas Nordfjell, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Bitr. handledare: Jonas Bohlin, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning
Examinator: Dan Bergström, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E
Kurstitel: Master thesis in Forest science
Kursansvarig inst.: Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Kurskod: EX0908
Program/utbildning: Jägmästarprogrammet

Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2019
Omslagsbild: Rasmus Wictorsson
Serietitel: Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Delnummer i serien: 2019:1
Elektronisk publicering: <https://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Fjärranalys, 3D-punktmoln, Hjulspår, Körskador, Markstörning, Remote sensing, 3D-Point Clouds, Wheel ruts, Rutting, Tracks, Soil disturbance, Structure from motion, SfM.

Sammanfattning

Markstörning i form av spårbildning och kompaktering av marken är oftast påtagliga vid maskinellt avverkade områden. Skoglig inventering och kartläggning av skogsrelaterade skador med hjälp av flygfotografering har använts sedan 1970-talet. Men det var inte förrän 2010-talet som drönare ansågs vara tillräckligt utvecklade för att tillämpas kostnadseffektivt inom konventionellt skogsbruk. Stereofotogrammetri har demonstrerats för datainsamling om markens ytstruktur redan under 1990-talet. Trots detta anses tekniken vara ny inom skogsbruket.

Studiens övergripande syfte var att utveckla en metod för att mäta spårddjup efter skogsmaskiner på förnygringsavverkade områden med drönare och digital stereofotogrammetri, samt att undersöka noggrannhet och precision med denna metod. Den generella hypotesen var att mätnoggrannheten var 1,5-2 gånger lägre än Ground Sampling Distance (GSD) i flygbilderna.

På ett fältobjekt och ett kontrollobjekt användes en utvecklad metod med fjärrmätning från 60 m resp. 120 m flyghöjd och en manuell referensmetod. Inga statistiskt signifikanta skillnader (p -värde = 0,277-0,785) fanns totalt sett mellan manuell mätning och fjärrmätning vid 60 m resp. 120 m. Delades mätningar av spårddjup upp i kontrollobjektets respektive provytor fanns en statistiskt signifikant skillnad (p -värde = 0,001) mellan manuell mätning och fjärrmätning 120 m, vilket visade att fjärrmätningen från 120 m underskattade spårddjupet med 2,2 cm. Regressionsanalysen visade en stark korrelation mellan manuell mätning och fjärrmätning (R^2 0,77-0,99).

Med avseende på mätnoggrannhet och mätprecision är fjärrmätning av spårddjupet en likvärdig metod till manuell mätning, med begränsningen att korrekt spårddjup inte kan mätas om det finns vatten i hjulspåren. Vid praktisk tillämpning kan fjärrmätningen bidra till effektivisering inom skogsbruket.

Nyckelord: Fjärranalys, 3D-punktmoln, Hjulspår, Körsador, Markstörning.

Abstract

Soil disturbance due to wheel ruts and compaction of the soil is usually evident in machine-operated areas. Forestry inventory and mapping of forest related damage using aerial photography has been used since the 1970s. But it was not until the 21st century that drones were considered sufficiently developed and cost effective to be applied in the conventional forestry industry. Stereophotogrammetry has been demonstrated for data collection on the surface structure of the soil as early as the 1990s. Despite this, the technology is considered new in forestry.

The overall purpose of the study was to develop a method for measuring wheel ruts made by forest machines in regeneration-felled areas with drone and digital stereophotogrammetry, and to investigate accuracy and precision with this method. The general hypothesis was that the measurement accuracy was 1.5-2 times lower than Ground Sampling Distance (GSD) in the aerial images.

In a field object and a control object a developed method was used with remote measurement from 60 m and 120 m flight height and a manual reference method. No statistical significant differences (p -value = 0.277-0.785) were found in total between manual measurement and remote measurement 60 m or 120 m. If the wheel ruts depth measurements from the control object were divided into respective sample area, there was a statistical significant difference (p -value = 0.001) between manual measurement and remote measurement 120 m, which indicated that the remote measurement underestimated the wheel ruts depth by 2.2 cm. Regression showed a strong correlation between manual measurement and remote measurement (R^2 0.77-0.99).

Regarding to measurement accuracy and precision, the remote sensing method is an equivalent method to manual measurement in terms of estimation of wheel ruts depth, with the limitation of water-filled wheel ruts. In practical application, remote measurement can contribute to cost savings in forest operations.

Keywords: Remote sensing, 3D-Point Clouds, Wheel ruts, Rutting, Soil disturbance, Structure from motion, SfM.

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 hp och har genomförts, i samarbete med VIDA Skog AB, vid Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi samt med stöd från Institutionen för Skoglig Resurshushållning, båda institutioner vid Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå.

Jag vill tacka VIDA Skog AB för förtroendet, mina handledare Pelle Ström, VIDA Skog AB, Tomas Nordfjell, Sveriges Lantbruksuniversitet och biträdande handledare Jonas Bohlin, Sveriges Lantbruksuniversitet för stöd och hjälp under arbetets gång.

Umeå januari 2019

Rasmus Wictorsson

Innehållsförteckning

1 Inledning	2
1.1 Markstörningar och kompaktering inom skogsbruket	2
1.2 Fjärranalys inom skogsbruket	2
1.3 Flygfotografering och digital stereofotogrammetri	3
1.4 Stereofotogrammetrisk mätning av markpåverkan	4
1.5 Syfte	5
2 Material och metoder	6
2.1 Försöksområden	6
2.2 Inventeringsmetoder	11
2.2.1 Fjärrmätning	11
2.2.2 Manuell mätning	14
2.3 Analys	15
3 Resultat	16
3.1 Spårdjup på fältobjektet	16
3.2 Spårdjup på kontrollobjekt	20
4 Diskussion	26
4.1 Fjärrmätning och manuell mätning	26
4.2 Fältobjekt och kontrollobjekt	27
4.3 Felkällor	33
4.4 Fjärrmätningens fördelar och nackdelar jämfört med manuell mätning	34
4.5 Praktisk tillämpning och utveckling	34
4.6 Slutsats	36
5 Referenser	37
Bilagor	39
Bilaga 1. Detaljerad information om material för fjärrmätning	39
Bilaga 2. Detaljerat resultat från fältobjektets mätning av spårdjup.	40

1 Inledning

1.1 Markstörningar och kompaktering inom skogsbruket

Markstörning är en av de vanligast förekommande skador som uppstår vid skogsbruk (Venanzi et al. 2016). Det är vid maskinellt avverkade områden som markskador i form av spårbildning i och kompaktering av marken oftast uppmärksammas (Eliasson & Wästerlund 2007; Koren et al. 2015). Markkompaktering och spårbildning är två olika former av markskador. Spårbildning ökar risken för markerosion och markkompaktering minskar till exempel vattenrörligheten i marken. Det är enkelt att mäta spårbildning i form av spårdjup till skillnad från markkompaktering där markens porositet minskar. Markkompaktering är ofta starkt korrelerad med spårdjup, vilket bidrar till att mätningar av spårdjup i många fall kan ge en bra uppfattning om markkompakteringen (Marra et al. 2018). Utöver markerosion och lägre porositet, minskar också lufttillförseln i jorden vilket sammantaget ger försämrade tillväxt och återväxt (Cambi et al. 2015).

Det är marktrycket från skogsmaskinernas hjul eller band som orsakar markkompaktering. Ett högre marktryck och fler överfarter ger ökad risk för körskador (Marra et al. 2018). Risken för körskador är som störst under skotning av virket från avverkningstrakten ut till avlägg vid bilväg (Pierzchała et al. 2016). Körskador uppstår när marktrycket från maskinen överstiger markens bärförmåga, men markskador kan även uppstå succesivt där ökat markfäste krävs och vid hjulspinn (Eliasson & Wästerlund 2007). Störningar av marken i form av markslitage resulterar i exponerad jord, erosion och risk för urlakning av tungmetaller som är skadligt för miljön (Frey et al. 2009; de Wit et al. 2014; Eklöf et al. 2014).

Omfattningen av körskador och dess konsekvenser beror till stor del på jordart, markfuktighet, temperatur, drivningssystem och maskinernas utformning (Grigal 2000; Frey et al. 2009; Picchio et al. 2012; Cambi et al. 2015). Tidigare studier har visat att en trakt med optimalt genomförd drivning, med kortvirkesmetoden, utsätter minst 12% av markytan för trafik med maskiner (Eliasson 2005). Detta i kombination av förändringar i klimatet och en ökad medeltemperatur som bidrar till kortare perioder med fryst mark och längre perioder med vattenmättnad i jorden i de boreala zonerna förvärrar situationen. Det bidrar till att problem gällande markens bärighet kan förväntas öka i framtidens skogsbruk (Soja et al. 2007).

Manuella metoder för att uppskatta markkompaktering och körskador är vanligtvis tidskrävande, dyra och det är svårt att översiktligt bedöma omfattningen av körskador för en större areal (Lotfalian & Parsakhoo 2009; Bagheri et al. 2013; Koren et al. 2015). Den traditionella manuella fältinventeringsmetoden mäter hjulspårens tvärsnitts- och längdprofiler (Koren et al. 2015; Pierzchała et al. 2016; Marra et al. 2018) och genomförs vanligtvis med flera meter mellan mätpunkterna, vilket resulterar i grova uppskattningar av hjulspårens totala volym (Koren et al. 2015).

1.2 Fjärranalys inom skogsbruket

Vid skoglig inventering och kartläggning av skogsrelaterade skador är flygfotografering en vanligt förekommande metod som har använts sedan 1970-talet (Sylvander 1972, 1979). Tekniken med fjärrstyrda farkoster och drönare; Unmanned Aerial Vehicle (UAV), har funnits inom svenska försvarsmakten sedan år 1959 (Petersson 2009). En omfattande utveckling har sedan dess skett för militär användning

(Lykke-Olesen 2017). Men det var vid 2010-talet som tekniken nådde den civila marknaden och drönare ansågs vara tillräckligt utvecklade för att tillämpas kostnadseffektivt inom det konventionella skogsbruket (Turner et al. 2012; Öhman & Asplund 2015; Öhman & Edlund 2015). Vid 2010-talet fanns olika drönarsystem som kostade mellan 176 000-380 000 kr (Öhman & Edlund 2015) och användarna var erfarna drönarpiloter. I takt med att tekniken har utvecklats och blivit vanligare, har priset på drönare sjunkit betydligt till omkring 15 000 kr för enklare konventionella drönare för konsumenter (NetOnNet 2018). Utvecklingen har gjort drönarna tillgängliga till fler användare som har börjat se möjligheterna kopplade till användning av lågkostnads-drönare med monterade kameror (Pierzchała et al. 2016).

Från konventionella plattformar som satelliter och bemannade flygplan är vanligtvis den högsta spatiala upplösningen mellan 20-50 cm per pixel. En drönare kan däremot flyga lägre och uppnå en spatial upplösning av 1 cm per pixel och ett avstånd på 1 cm mellan två på varandra följande pixelcentrum i marknivå; Ground Samplings Distance (GSD). Drönare kan även erhålla en högre temporal (tidsmässig) upplösning, eftersom den inte är bunden till tillgängliga flygplan eller en specifik omloppsbana (Turner et al. 2012). Studier visar att drönare är ett verktyg som kostnadseffektivt kan samla in data i form av högupplösta flygfoton (Öhman & Asplund 2015; Öhman & Edlund 2015). Öhman och Asplund (2015) visar i deras studie att fältinventering av stormfällad skog har en medelprestation på cirka 14 hektar/timme och drönarinventering från 120 meters flyghöjd cirka 27 hektar/timme. De aktuella flygbilderna kan efter vidare bearbetning effektivisera den operativa verksamheten inom skogsindustrin. Vid drivning av stormfällad skog var tidsbesparingen 20-60 % beroende på om skördarföraren fick skapa genvägar i bestånden genom att ta ner friska träd eller ej (Öhman & Asplund 2015).

1.3 Flygfotografering och digital stereofotogrammetri

Om flygbilder insamlas på ett sådant sätt att varje objekt på marken syns i flera överlappande bilder kan tredimensionell (3D) information genereras utifrån bilderna. Detta sker genom stereofotogrammetri och resulterar i en stor mängd 3D-punkter, så kallat punktmoln. För att kunna skapa ett detaljerat 3D-punktmoln och korrekt bildmatchning mellan flygbilder krävs ett stort överlapp. En flygfotografering med 90/80 i överlapp innebär en bildöverlappning på 90 procent längs flygstråk och 80 procent mellan flygstråk. En ökning av överlappande flygbilder längs flygstråket resulterar i ett ökat dataunderlag för bättre skapande av 3D-punktmolnet utan att flygtid och kostnad ökar. Ökande överlapp mellan flygstråken resulterar också i ett ökat dataunderlag för bättre skapande av 3D-punktmolnet, samtidigt som datamängden och planerad flygtid ökar. Digital stereofotogrammetri baseras på algoritmer som identifierar kännetecken inom en bild och matchar motsvarande identifierade kännetecken i övriga överlappande flygbilder (Marra et al. 2018). Därefter beräknas den relativa positionen för alla matchade objekt via triangulering (metod för att matematiskt bestämma avståndet till en punkt utifrån två punkter med känt avstånd mellan sig). Kamerans position och orientering är känd i ett kartografiskt referenssystem, vilket gör det möjligt att skapa en 3D-punkt för de identifierade objekten i samma koordinatsystem (Brasington et al. 2012; Bohlin 2017). När detta har utförts på alla identifierade objekt i flera överlappande flygbilder skapas ett punktmoln. Stereofotogrammetri liknar tekniken Structure-from-Motion (SfM) som genererar tredimensionella strukturer från överlappande bilder genom kalibrering av kamerans orientering under blocktrianguleringen vid orienteringen av bilder. Inom denna studien omfattas SfM under benämningen stereofotogrammetri. Till skillnad från laserskanning som bildar ett 3D-punktmoln av returnerade laserpulser utan naturlig färgsättning,

skapar stereofotogrammetri tekniken ett naturligt färgat 3D-punktmoln av den markyta och vattenyta som är visuellt synlig av kameran (Turner et al. 2012).

1.4 Stereofotogrammetrisk mätning av markpåverkan

Stereofotogrammetri har demonstrerats för datainsamling om markens ytstruktur redan under mitten av 1990-talet (Warner 1995). Stereofotogrammetris användning inom skogsbruket anses däremot vara en ny teknologi och inventeringsmetod vid bedömning av hjulspårens djup och form (Haas et al. 2016; Pierzchała et al. 2016). Utvecklingen av stereofotogrammetri har bidragit till en förbättring av topografiska metoder tack vare en bättre tillgänglighet, lägre kostnad och ökad automatisering av arbetsflödet för användare av aktuella programvaror (Nadal-Romero et al. 2015; James & Robson 2012). Användning av mer modern teknik som markburen laserskanning, luftburen laserskanning, drönare och stereofotogrammetri med skapande av ett 3D-punktmoln kan ge mer detaljerad data av hjulspåren jämfört med manuella metoder (Giannetti et al. 2017; Koren et al. 2015; Pierzchała et al. 2016, 2014; Cambi et al. 2018; Haas et al. 2016).

I en tidigare studie har stereofotogrammetrisk mätning av hjulspår på nära håll visat på god matchning med manuella mätningar och Root Mean Square Error (RMSE) mellan 2,07 och 3,84 cm för mätt spår djup (Pierzchała et al. 2016). Senare studier där mätnoggrannhet för stereofotogrammetri på nära håll, 3 meter avstånd, har jämförts med manuella mätningar av spår djupet visade en skillnad på 0,7-4,6% (0,3-0,7mm), medelvärde 2.1%, och ett statistiskt signifikant samband mellan de olika mätresultaten (p-värde <0,05) (Marra et al. 2018).

Nya regler som underlättar kommersiell användning av drönare började gälla den 1 februari 2018 (Transportstyrelsen 2017, 2018). Det som ändrats är bland annat att kommersiellt använda drönare som väger mindre än 7 kg och flygs inom synhåll på max 120m höjd och med en topphastighet på maximalt 90 km/h inte längre kräver tillstånd från transportstyrelsen (Transportstyrelsen 2017, 2018). Förändringarna bidrar till en ökad efterfrågan på teknikens möjligheter och är en bidragande orsak till denna studie.

1.5 Syfte

Det övergripande syftet var att utveckla en metod för att mäta spår djup efter skogsmaskiner på föryngringsavverkade områden med drönare och digital stereofotogrammetri, samt att undersöka noggrannhet och precision med denna metod. Vid vattenfyllda hjulspår var syftet att mäta avståndet från markyta ner till vattenytan.

Detaljerade syften var att undersöka om:

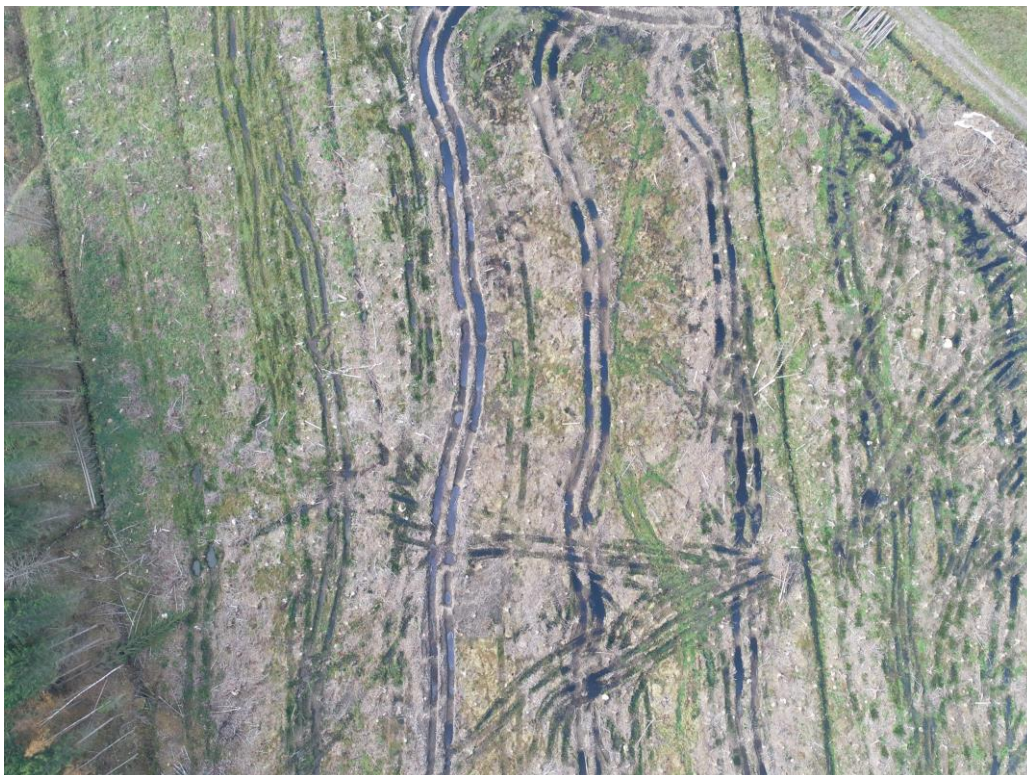
- i) mät noggrannheten skiljer sig åt om drönarens flyghöjd är 60 eller 120 meter.
- ii) mät noggrannheten skiljer sig åt om hjulspåren är på ett helt öppet område eller nära en skogskant.
- iii) mät noggrannheten skiljer sig åt om hjulspåren är djupa eller grunda.
- iv) mät noggrannheten skiljer sig mellan att mäta spår djup i ett ej vattenfyllt spår och att mäta avståndet från markytan ner till vattenytan i ett vattenfyllt spår.

Hypoteserna var att en flyghöjd på 60 meter resulterar i högre noggrannhet och precision, en skogskant nära hjulspår orsakar lägre noggrannhet och precision, djupa hjulspår orsakar lägre noggrannhet och precision och vattenfyllda hjulspår orsakar lägre noggrannhet och precision. Den generella hypotesen var att mät noggrannheten är 1,5-2 gånger lägre än GSD i flygbilderna, vilket innebär cirka 3 cm från 60 meters flyghöjd och cirka 6 cm från 120 meters flyghöjd. Hypotesen var också att drönarmätning är tillräckligt bra för att kunna ersätta manuell mätning.

2 Material och metoder

2.1 Försöksområden

Datainsamling från fältobjektet genomfördes i oktober månad 2018 inom en förnygringsavverkad trakt utanför Ulricehamn, Västra Götaland län. Fältobjektets position var med god marginal utanför kontrollzon för flygplats och helikopterflygplats (Luftfartsverket 2018). Avverkningsuppdraget var utfört av VIDA Skog AB och var en slutavverkning med uttag av även avverkningsrester (grenar och toppar; GROT). Traktens totala areal var 33,3 hektar som ska bli industrimark i framtiden. Tidigare trädslagsfördelning var 20 procent tall och 80 procent gran med en medelstam på 0,24 m³fub. Efter en visuell bedömning av området valdes ett 4,49 hektar stort delområde med relativt hög koncentration av hjulspår (figur 1). Antalet provytor inom fältobjektet var 20 stycken med en medellängd av 10 meter. Varje provyta delades upp i höger och vänster hjulspår där mätningar och registreringar utfördes varje meter.



Figur 1. Flygfoto från 120 m över en del av fältobjektet med hög koncentration av hjulspår.

Figure 1. Aerial view from 120 m flight height over a part of the field object with high concentration of wheel ruts.

Fältobjektets provytor var heterogena gällande spårdjup, spårbredd, markvegetation, vattenfyllnad, marknivå och omfattning av GROT (figur 2, 3 och 4).



Figur 2. Till vänster ett grunt och homogent hjulspår och till höger ett djupare och mer heterogent hjulspår. Marknivån är ojämn med mycket avverkningsrester.

Figure 2. To the left a shallow and homogeneous wheel rut and to the right a deeper and more heterogeneous wheel rut. The ground level is uneven with a lot of felling residues.



Figur 3. Manuell mätning med spårdjupsmätare av ett djupt hjulspår med mycket avverkningsrester och ojämn marknivå innehållande trädstubbar, stenar och jordhögar.

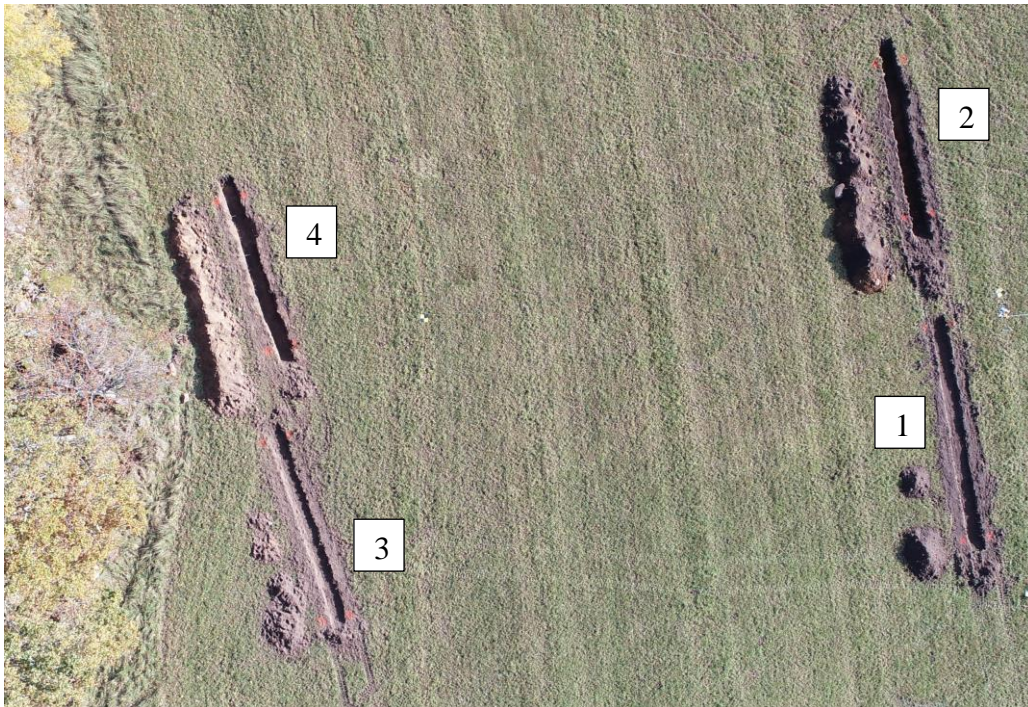
Figure 3. Manual measurement of a deep wheel rut with lots of felling residues and uneven ground level containing tree stumps, rocks and soil piles.



Figur 4. Manuell mätning av avstånd ner till vattenyta med spårdjupsmätare av ett vattenfyllt hjulspår med relativt jämn marknivå på fältobjektet.

Figure 4. Manual measurement of distance down to water surface of a water-filled wheel ruts with relatively even ground level at the field object.

För att kunna minimera eventuella felkällor som var kopplade till mätning av spårdjup inom det föryngringsavverkade området konstruerades dessutom kontrolltytor bestående av spår grävda med grävmaskin (figur 5 och 6). Kontrolltytorna skapades för att kunna jämföra mätprecisionen och mätnoggrannheten av spårdjupet, när den omgivande variationen av omgivande grundförhållande, ytstruktur, vegetation, marknivå och spårdjup minimerades (figur 5, 6, 7, 19 och 20). Flygfotograferingen och datainsamlingen av kontrollobjektet genomfördes i oktober månad 2018 på gräsbevuxen jordbruksmark utanför Fristad, Västra Götalands län.



Figur 5. Flygfoto av kontrolltytor: 1. Öppen mark "grund", 2. Öppen mark "djup", 3. Närbelägen skog "grund" och 4. Närbelägen skog "djup".

Figure 5. Aerial view of control areas: 1. Open field "shallow", 2. Open field "deep", 3. Near forest "shallow" and 4. Near forest "deep".



Figur 6. Kontrolltyta 1. "Öppen mark "grund"" med homogen marknivå och spårdjup.

Figure 6. Control area 1. Open field "shallow" with homogeneous ground level and groove depth.

Inom kontrollobjektet (2,41 hektar) skapades 4 stycken kontrolllytor, vardera med en medellängd av 10 meter (figur 5). Två kontrolllytor med närbelägen skog utgjordes av ett grunt spår (medeldjup 22 cm) och ett djupt spår (medeldjup 83 cm). Minsta avståndet mellan kontrolllytan och skogen (medelhöjd 20 m) var 3,1 meter respektive 4,7 meter (figur 5). Kontrolllytorna på öppen mark utgjordes av ett grunt spår (medeldjup 20 cm) och ett djupt spår (medeldjup 59 cm). Värdena för grunt- respektive djupt spår var godtyckligt valda och mätning av kontrolllytornas spår djup genomfördes i efterhand enligt manuell mätmetod (beskriven nedan). Inom kontrolllytorna utfördes mätningar och registreringar varje halvmeter för att öka antalet mätpunkter.

En bild av ett 3D-punktmoln med naturlig färgsättning skapat från 60 meters flygfotografering illustrerade samma område som figur 5 med en mycket hög detaljnivå och densitet med punkter av markstrukturen (figur 7).



Figur 7. 3D-punktmoln från 60 m flygfotografering över kontrollobjektets kontrolllytor 1. Öppen mark "grund", 2. Öppen mark "djup", 3. Närbelägen skog "grund" och 4. Närbelägen skog "djup". De röda linjerna är tvärsnittsmarkeringar från "Cross sections generation"-verktyget vilket markerar intervallet för mätpunkter. Naturlig färgsättning.

Figure 7. 3D point cloud from 60 m aerial photography of the control areas 1. Open field "shallow", 2. Open field "deep", 3. Near forest "shallow" and 4. Near forest "deep". The red lines are cross-sectional markings from the "Cross sections generation" tool, which marks the interval for measuring points. Natural color scheme.

Flygfotograferingen på 60 meters flyghöjd (resulterad flyghöjd 57,4 m) över det fältobjektet resulterade i 231 stycken flygbilder, en total flygtid på 11 minuter och 20 sekunder och en flygsträcka på 2748 meter. Förhållandena för flygfotograferingen resulterade i ett GSD på 1,44 cm/pixel. Tidsåtgången för datainsamling med drönare från 60 meters flyghöjd var 30 minuter inklusive uppackning och flygplanering av

trakten. Flygfotograferingen på 120 meters flyghöjd (resulterad flyghöjd 119,0 m) över fältobjektet resulterade i 68 stycken flygbilder, en total flygtid på 5 minuter 44 sekunder och flygsträcka på 1616 meter. Förhållandena för flygfotograferingen resulterade i ett GSD på 2,97 cm/pixel. Tidsåtgången för datainsamling med drönare var 25 minuter inklusive uppackning och flygplanering av trakten.

För fältobjektet var tidsåtgången vid datainsamling med manuell mätning 8 timmar effektiv tid. Ytterligare 7 timmar krävdes för en visuell bedömning av traktens fördelning av körsador och därefter fördelning av provytor.

Flygfotograferingen på 60 meters flyghöjd (resulterad flyghöjd 59,6 m) över kontrollobjektet resulterade i 135 stycken flygbilder, en total flygtid på 8 minuter 9 sekunder och en flygsträcka på 1630 meter. Förhållandena för flygfotograferingen resulterade i ett GSD på 1,47 cm/pixel. Flygfotograferingen på 120 meters flyghöjd (resulterad flyghöjd 121,0 m) över kontrollobjektet resulterade i 40 stycken flygbilder, en total flygtid på 5 minuter 16 sekunder och en flygsträcka på 962 meter. Förhållandena för flygfotograferingen resulterade i ett GSD på 3,00 cm/pixel.

2.2 Inventeringsmetoder

För att mäta djupet av hjulspåren användes fjärrmätning från 60 respektive 120 meters flyghöjd som jämfördes mot en markbaserad manuell referensmetod (manuell mätning) för att beräkna mätprecisionen och mätnoggrannheten. Metoden för fjärrmätning använde digital stereofotogrammetri där hjulspårets djup mättes utifrån ett flygbildsbaserat 3D-punktmoln av markstrukturen. Inom varje provyta eftersträvades en så homogen markskada som möjligt gällande spårdjupet. Vid manuell mätning och fjärrmätning har inte exakt samma mätpunkter används inom och mellan behandlingarna. Uppskattningsvis var avståndet mellan mätpunkterna upp emot 10 cm och betraktas därför som olika.

2.2.1 Fjärrmätning

Under flygfotograferingen av försöksområdena var varken datamängden eller flygtiden en begränsande faktor, därför valdes 80/80 överlapp i flygbilderna. Vid planering av drönarens (DJI Phantom 4 Pro) flygrutter användes programmet Pix4Dcapture (version 4.0.0) applicerat i en Iphone 6. Flygområdet markerades på en karta i form av en rektangel som täckte aktuellt område. Genom val av flyghöjd (60 m resp. 120 m), kameravinkel på 90 grader mot markplanet (nadir), flyghastighet "Normal+", automatisk exponering och snabbt utlösningsslag skapades automatiskt raka parallella flygstråk inom flygområdet. Förutsättningarna under flygfotograferingen av fältobjektet var gråmulet väder, temperaturen cirka + 5 grader Celsius och utan frusen nederbörd på marken. Förutsättningarna under flygfotograferingen av kontrollobjektet var soligt väder med växlande molnighet, temperaturen cirka + 5 grader Celsius och utan frusen nederbörd på marken.

För att uppnå en högre noggrannhet för positionering och korrekt orientering av flygbilderna användes en RTK-GPS (Real-Time-Kinematic-GPS) av märket Trimble GeoXR 6000. Flertalet kontrollpunkter, GCP:er, markerades med sprayfärg och

positionen mättes vid marknivå. Inom fältobjektet utplacerades 12 stycken GCP:er och inom kontrollobjektet utplacerades 10 stycken GCP:er.

För mer detaljerad information om material använt under fjärrmätningen, se bilaga 1.

Flygfotografering genomfördes enligt följande:

1. En heltäckande flygning av trakten genomfördes med hjälp av programmet Pix4DCapture (version 4.0.0) för att lokalisera eventuella körskador. Detta genomfördes från en flyghöjd på 120 meter och med 20/20 överlappande flygfotograferingar.
2. Flygfoton importerades sedan till en bärbar dator och körskadornas läge identifierades visuellt för trakten.
3. Körskador lokaliserades och provytornas hörn markerades i fält så att varje provyta omfattar ett homogent hjulspår.
4. GCP:er placerades ut och markerades i fält jämnt fördelat över aktuellt område.
5. En ny flygplanering skapades med flyghöjd på 60 meter och 80/80 överlapp över aktuellt område, därefter genomfördes flygfotograferingen. Detta steg genomfördes två gånger, den andra gången med flyghöjd på 120 meter.
6. När flygfotograferingen var klar påbörjas den manuella inventeringen i fält.

Vid flygfotograferingen av kontrolllytorna startades genomförandet vid steg nummer 3 ovan.

Bilderna från flygfotograferingen orienterades och processades till ett 3D-punktmoln i dataprogrammet Agisoft PhotoScan Professional (version 1.4.4). Arbetsgången var enligt följande:

1. Flygbilder importerades.
2. Projektionen konverterades till koordinatsystemet SWEREF 99 TM.
3. Automatisk uppskattning av bildkvalitén utfördes, bilder av dålig kvalitet raderades (Bildkvalité <0,5 på en skala 0-1).
4. Flygbilderna justerades och orienterades.
5. Verktuget "Gradual selection" användes för bearbetning av bilderna genom justering av "Image count", "Reprojection error" och "Projection accuracy". Flygbilderna orienterades efter varje justering.
6. Ground control points importerades som punkter.
7. Ground control points markerades ut på korrekt plats i bilderna.
8. Orienteringen av flygbilderna optimerades.
9. Ett 3D-punktmoln (Dense point cloud) skapades.
10. 3D-punktmolnet exporterades.

Bearbetningen av data från 60 m resp. 120 m flyghöjd genomfördes separat, båda enligt steg 1-10 ovan.

Mätningarna av spårdjupet i 3D-punktmolnet genomfördes i programmet Quick Terrain Modeler (version 8.0.7.0). Arbetsgången var enligt följande:

1. 3D-punktmolnet importerades.
2. Provytorna markerades och klipptes ut i punktmolnet.
3. Verktöget "Cross sections generation tool" användes för att markera startpunkten för mätningen. En linje ritades mellan två av hörnmarkeringarna, tvärs över hjulspåren. Där denna linje korsade hjulspårets centrum utgjordes startpunkten från där mätningarna av spårdjupet påbörjades.
4. Mätpunkter av spårets tvärsnitt genererades längs hjulspåret med en bredd på 160 cm och ett intervall på en meter. Generering av mätpunkter genomfördes separat för höger och vänster hjulspår inom varje provyta.
5. "Cross Sections Lines" exporterades till "Cross Section Analysis"-verktöget.
6. I "Cross Section Analysis"-verktöget användes mätverktöget för att sedan kunna utföra mätningar av spårets tvärsnittsprofil.
7. Spårdjupet mättes som höjden från tvärsnittsprofilens centrum till marknivån, med ett horisontellt avstånd på 80 cm. Medelvärde av spårdjupet i förhållande till marknivån på höger sida och spårdjupet i förhållande till marknivån på vänster sida resulterar i korrekt mätt spårdjup.

Mätningar inom 3D-punktmolnet från 60 m resp. 120 m flyghöjd genomfördes separat, båda enligt steg 1-7 ovan.

2.2.2 Manuell mätning

Spårdjupet inom provytan mättes med hjälp av en spårdjupsmätare, ett instrument som mäter spårdjupet i förhållande till marknivån på bestämt avstånd från hjulspårets centrum (Marra et al. 2018) (figur 3, 4 och 6). I studien ställdes spårdjupsmätarens avstånd in på 80 cm åt varje håll, mätt från spårdjupsmätarens centrum till mätpunkten för marknivån. Spårdjupsmätaren placerades vinkelrätt till spårets körrikning med en meters intervall och spårdjupet mättes som avståndet till botten i hjulspårets centrum (figur 3, 4 och 6). Förutom spårdjupet, registrerades för varje mätpunkt även markvegetationens typ och tjocklek vid mätpunkten för marknivån och om hjulspåret var vattenfylld eller inte. Vid vattenfyllda hjulspår registrerades spårdjupet till spårets botten och vattenytan. Mätningar för respektive hjulspår inom provytan gjordes separat.

Material för manuell mätning var:

- Spårdjupsmätare (mätnoggrannhet $\pm 0,5$ cm)
- 50 meters måttband
- Tumstock (för eventuellt mätning av extra omfattande markvegetation)
- Sprayfärg (markeringsfärg)
- Snöre (6-8m)

Manuell mätning genomfördes enligt följande:

1. Tidigare utmärkt provyta lokaliserades.
2. Ett snöre spändes upp mellan två av hörnmarkeringarna, tvärs över hjulspåren. Där detta snöre korsade hjulspåret utgjordes startpunkten från där mätningarna av spårdjupet påbörjades.
3. Ett måttband placerades mellan hjulspåren, med start vid det korsande snöret.
4. Mätningar och registreringar utfördes löpande längs hjulspåret med ett intervall på en meter (för kontrolltytor 0,5 m). Mätningarna genomfördes separat för höger och vänster hjulspår inom provytan.

Manuella mätningar inom respektive provyta genomfördes separat, enligt steg 1-4 ovan.

2.3 Analys

Mätningarna av spårdjupet från manuell mätning och fjärrmätning registrerades i Microsoft Excel 2016 för vidare beräkning av djupet av hjulspårets medelvärde, standardavvikelse, Root Mean Square Error (RMSE) och differens av medelvärdet mellan manuell mätning, 60 meters mätning och 120 meters mätning. Beräkning av noggrannhet avser närheten av ett uppmätt värde till referensvärdet (RMSE, standardfel och differens mot referensmetod) och precision hänvisar till närheten av två eller flera mätvärden i förhållande till varandra (standardavvikelse). För att visa osäkerheten i mätningarna beräknades RMSE som är ett mått på spridningen av avvikelser. Vid beräkning av RMSE användes följande formel:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

Där:

n = antalet observationer.

P_i = skattat värde.

O_i = observerat värde.

Analysen av resultatet utfördes i MiniTab 18 (version 18.1). Data kontrollerades grafiskt ifall den var normalfördelad med homogen varians och antagande om oberoende data. Analysen genomfördes av mätningar för mätt spårdjup mellan manuell mätning och fjärrmätning från 60 m resp. 120 m flyghöjd. Genomförande av En-vägs ANOVA och hypotestest (H₀: alla medelvärden är lika, H_A: alla medelvärden är inte lika) visade om det fanns statistiskt signifikanta skillnader mellan metoderna med konfidensgraden 95%. Om det fanns statistiskt signifikanta skillnader visade ett följande post-hoc test enligt Dunnets metod mellan vilka mätmetoder det fanns skillnader. För att kunna utesluta ifall det fanns någon interaktionseffekt mellan hur mätmetoderna mäter beroende av provytans läge resp. spårdjup (öppen mark eller nära skog resp. grund eller djup) på kontrollobjektet genomfördes Två-vägs ANOVA mellan mätmetod och provytans läge resp. spårdjup (H₀: Interaktionseffekten är lika med noll). Därefter genomfördes analysen enligt ovan nämnda En-vägs ANOVA med följande post-hoc test enligt Dunnets metod.

För att visa korrelationen mellan mätmetoderna och hur väl fjärrmätning kan predicera manuell mätning utfördes regressionsanalys i Microsoft Excel 2016.

Regressionsanalysen bestod av mätningar från manuell mätning och fjärrmätning från 60 meters resp. 120 meters flyghöjd, där den beroende variabeln var manuell mätning (y) och den oberoende variabeln var fjärrmätning (x). Korrelationen visar styrkan och riktningen (korrelationskoefficienten) mellan den beroende och oberoende variabeln där 1 = maximalt positivt samband, -1 = maximalt negativt samband och 0 = inget samband. Förutsatt att det är ett linjärt samband mellan x och y visar förklaringsgraden (R²) hur stor del av variationen i den beroende variabeln (y) som förklaras av variationer i den oberoende variabeln (x). Ingen justering eller uteslutning av extremvärden har skett under databearbetningen eller analyserna.

3 Resultat

3.1 Spårdjup på fältobjektet

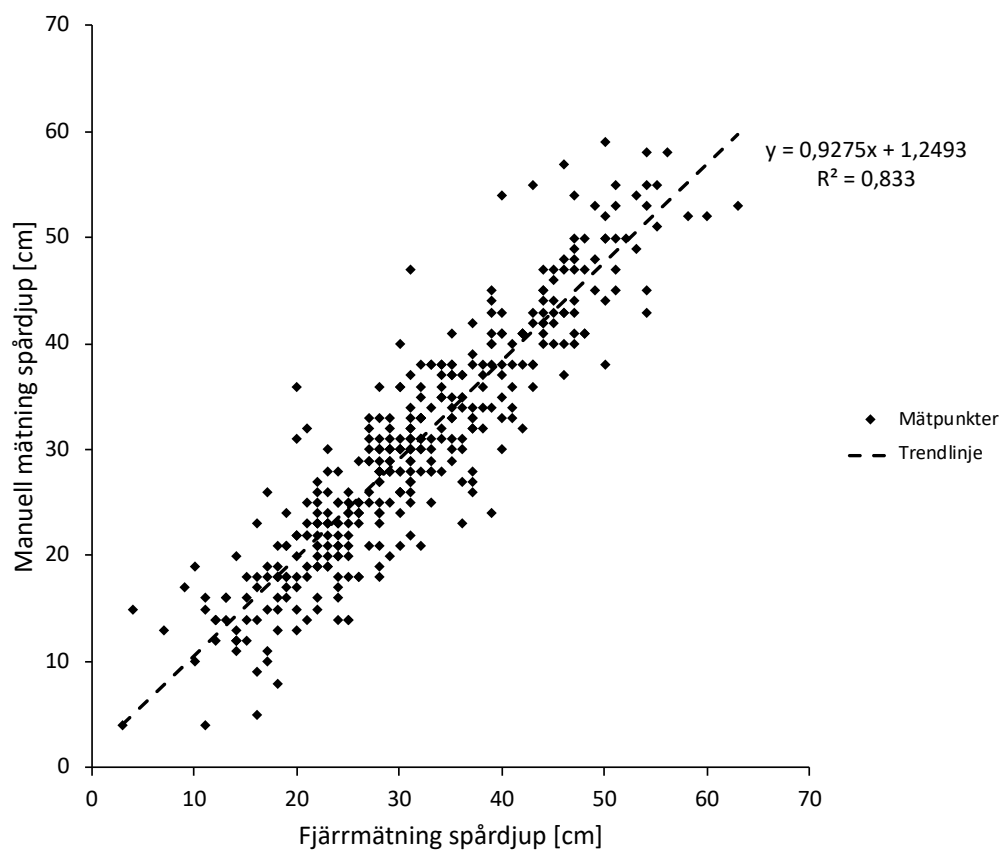
Totalt sett var det inga statistiskt signifikanta skillnader i mätt spårdjup mellan metoderna manuell mätning och fjärrmätning från 60 meter (p-värde = 0,373) respektive 120 meter (p-värde = 0,277) flyghöjd (tabell 1). Data från de olika metoderna visade normalfördelning med en homogen varians, skillnader och spridning av mätvärden presenteras i tabell 1 nedan.

Tabell 1. Spårdjup på fältobjektets provtytor för de olika mätmetoderna. Inga statistisk signifikanta skillnader fanns mellan manuell mätning och fjärrmätning från 60 m (p-värde = 0,373) resp. 120 m (p-värde = 0,277).

Table 1. Wheel ruts depth at the field object's sample areas divided by measurement method. No statistical significant differences were shown between manual measurement and remote measurement from 60 m (p-value = 0.373) or 120 m (p-value = 0.277)

	Manuell mätning	Fjärrmätning (60 m)	Fjärrmätning (120 m)
Antal mätpunkter (N)	382	382	382
Medelvärde spårdjup [cm]	29,7	30,6	29,0
Standardavvikelse	6,1	6,3	6,4
RMSE		4,4	5,2

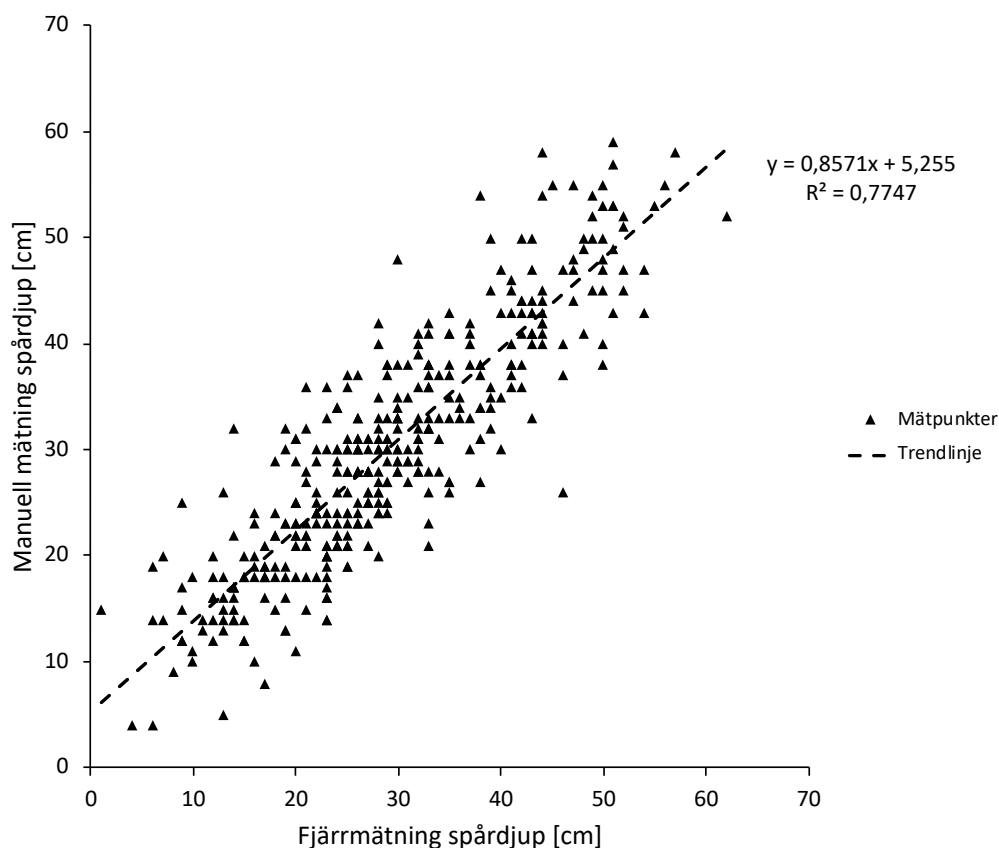
Regressionsanalys av manuell mätning och 60 meters fjärrmätning visade ett positivt linjärt samband, en korrelationskoefficient på 0,9275, $R^2 = 0,83$ och ett standardfel på 4,6 (figur 8).



Figur 8. Spårdjup vid fjärrmätning från 60 m höjd plottat mot spårdjup vid manuell mätning på fältobjektet.

Figure 8. Wheel ruts depth for remote measurement from a height of 60 m plotted against wheel ruts depth from manual measurement at the field object.

Regressionsanalys av manuell mätning och 120 meters fjärrmätning visade ett positivt linjärt samband, en korrelationskoefficient på 0,8571, $R^2 = 0,77$ och ett standardfel på 5,3 (figur 9).

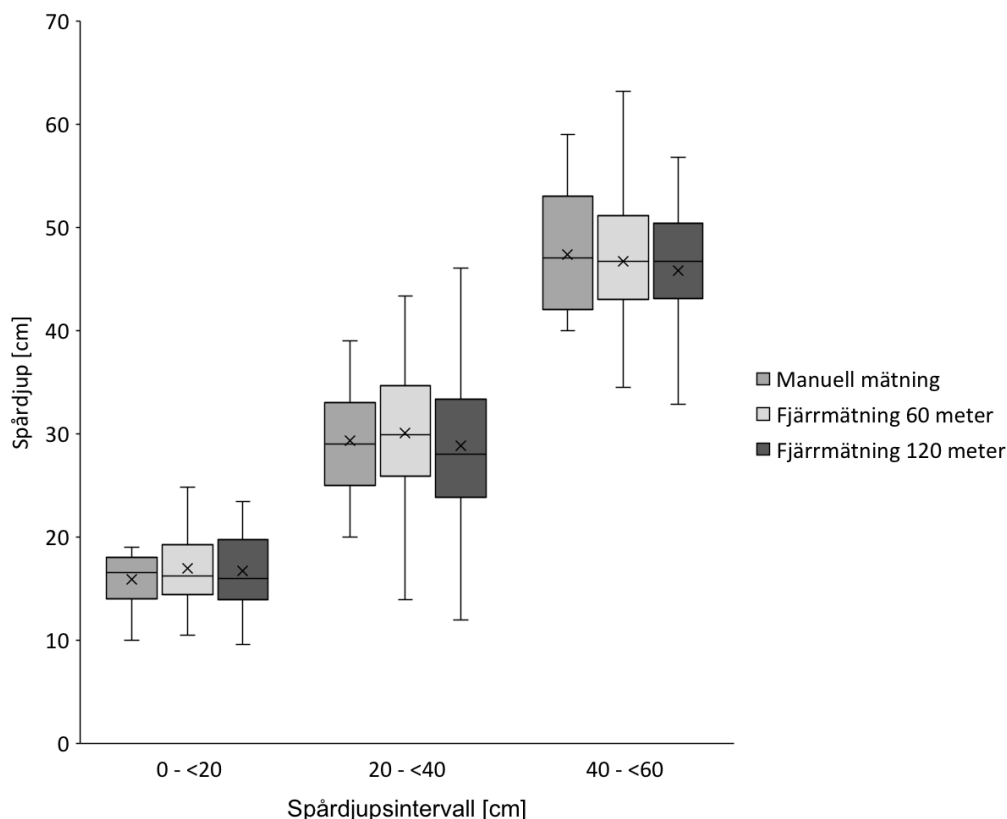


Figur 9. Spår djup vid fjärrmätning från 120 m höjd plottat mot spår djup vid manuell mätning på fältobjektet.

Figure 9. Wheel ruts depth for remote measurement from a height of 120 m plotted against wheel ruts depth from manual measurement at the field object.

Mer detaljerat resultat från mätning av spår djup utifrån mätmetod presenteras uppdelat per provyta och respektive hjulspår i bilaga 2.

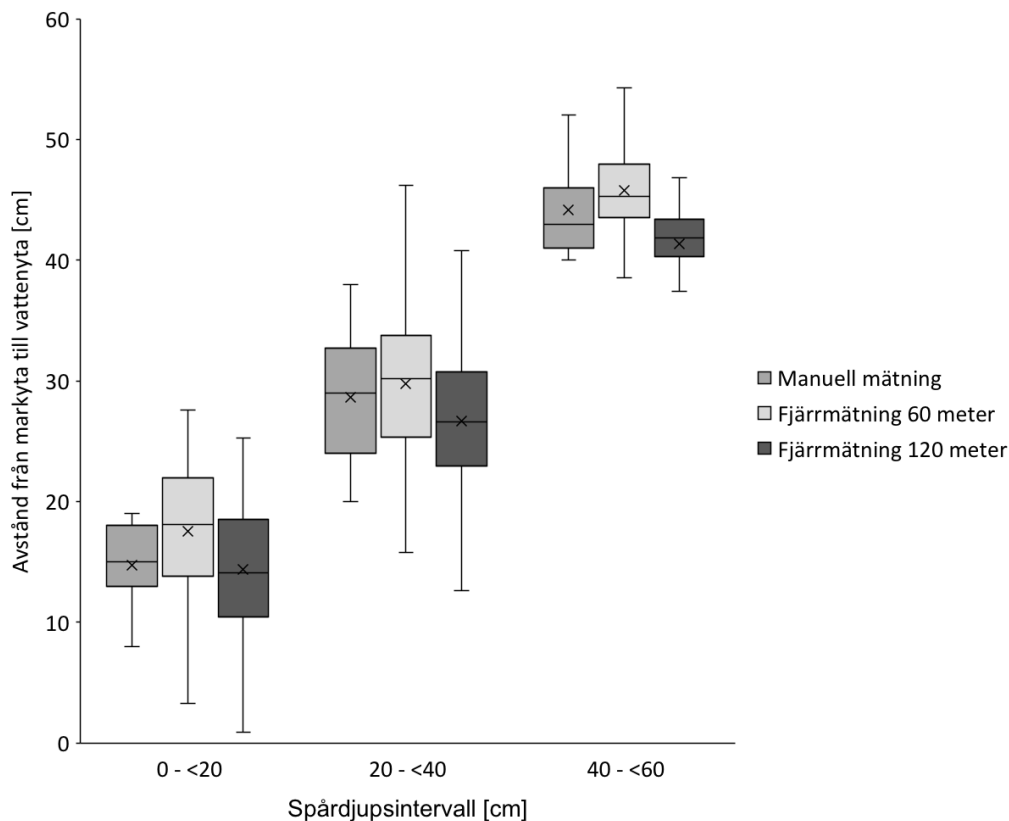
Vid mätning av ej vattenfyllda hjulspår varierade medelvärdena mindre jämfört med vattenfyllda hjulspår (figur 11) mellan manuell mätning, fjärrmätning 60 meter och fjärrmätning 120 meter (figur 10). Medelvärdena för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och fjärrmätning 120 m var vid intervallet "0-<20 cm" 16 cm, 17 cm och 17 cm, vid intervallet "20-<40 cm" 29 cm, 30 cm och 29 cm och vid intervallet "40-<60 cm" 47 cm, 47 cm och 46 cm (figur 10). Mätpunkterna för intervallet av spår djup är uppdelade utefter manuell mätning av spår djup och antalet mätpunkter för spår djupsintervall 0-<20 cm var 20 stycken, 20-<40 cm 117 stycken och 40-<60 cm var 58 stycken.



Figur 10. Mätt medelspår djup, inklusive median och spridningsintervall, för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och fjärrmätning 120 m vid fältobjekt uppdelat efter manuell mätt spår djupsintervall 0-<20 cm, 20-<40 cm och 40-<60 cm.

Figure 10. Estimated mean of wheel ruts depth, including median and spreading range, for manual measurement, remote measurement 60 m and 120 m at field object divided by manual measured wheel ruts depth intervals 0-<20 cm, 20-<40 cm and 40-<60 cm.

Mätning av djupet vid vattenfyllda hjulspår, där avstånd från markyta ner till vattenyta mätts, visade fjärrmätning från 60 meter överlag störst spridning i mätresultatet i förhållande till både manuell mätning och fjärrmätning från 120 meter (figur 11). Fjärrmätning från 120 meter visade bland övriga metoder lägst spridning av mätresultatet inom intervallet 40-<60 cm (figur 11). Medelvärdena för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och fjärrmätning 120 m var vid intervallet "0-<20 cm" 15 cm, 18 cm och 14 cm, vid intervallet "20-<40 cm" 29 cm, 30 cm och 27 cm och vid intervallet "40-<60 cm" 44 cm, 46 cm och 41 cm (figur 11). Mätpunkterna för intervallet av aktuellt djup är uppdelade utefter manuell mätning av avståndet mellan markyta ner till vattenyta och antalet mätpunkter för spår djupsintervall 0-<20 cm var 51 stycken, 20-<40 cm 113 stycken och 40-<60 cm var 23 stycken.



Figur 11. Mätt medelavstånd från markyta ner till vattenyta, inklusive median och spridningsintervall, för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och 120 m vid fältobjekt uppdelat efter manuell mätning i intervallen 0-<20 cm, 20-<40 cm och 40-<60 cm.

Figure 11. Estimated average distance from ground surface down to water surface, including median and spreading range for manual measurement, remote measurement 60 m and 120 m at field object divided by manual measured intervals 0-<20 cm, 20-<40 cm and 40-<60 cm.

3.2 Spårdjup på kontrollobjekt

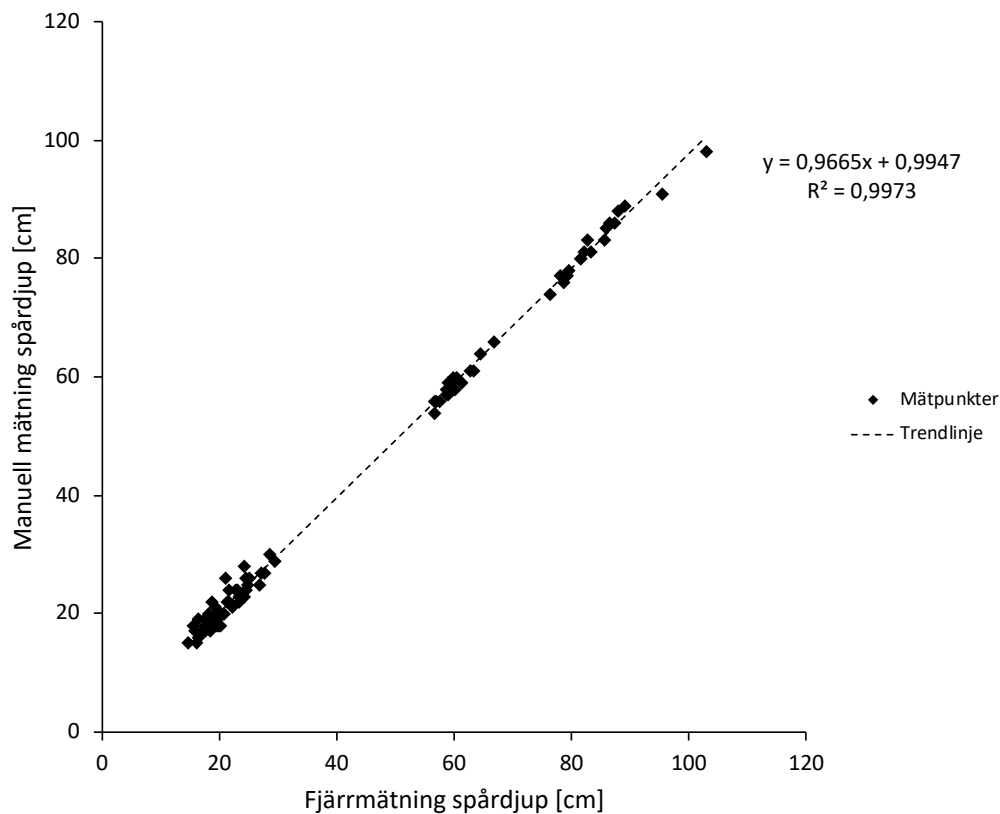
Inga statistiskt signifikanta skillnader (p -värde = 0,785) visade totalt sett mellan metoderna manuell mätning och fjärrmätning från 60 meter respektive 120 meter flyghöjd (tabell 2). Data från de olika metoderna visade normalfördelning med en homogen varians, skillnader och spridning av mätvärden presenteras i tabell 2 nedan.

Tabell 2. Spårdjup på kontrollobjektets provytor för de olika mätmetoderna. Inga statistisk signifikanta skillnader (p -värde = 0,785) fanns totalt sett mellan mätningarna

Table 2. Wheel ruts depth at the control object's sample areas divided by measurement method. No statistical significant differences (p -value = 0.785) were shown between the measurements in total

	Manuell mätning	Fjärrmätning (60 m)	Fjärrmätning (120 m)
Antal mätpunkter (N)	83	83	83
Medelvärde spårdjup [cm]	46,0	46,6	43,8
Standardavvikelse	4,1	4,2	3,9
RMSE		1,7	3,3

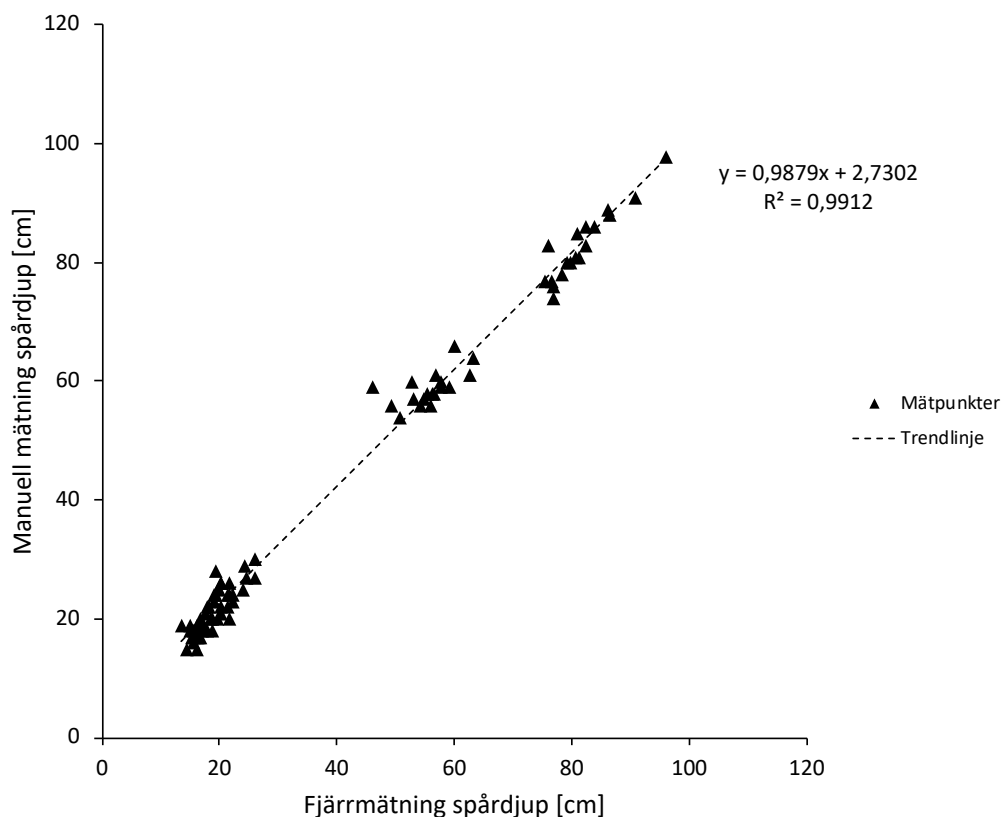
Regressionsanalys av manuell mätning och 60 meters fjärrmätning visade ett positivt linjärt samband, en korrelationskoefficient på 0,9665, $R^2 = 0,99$ och ett standardfel på 1,4 (figur 12).



Figur 12. Spårdjup vid fjärrmätning från 60 m höjd plottat mot spårdjup vid manuell mätning på kontrollobjektet.

Figure 12. Wheel ruts depth for remote measurement from a height of 60 m plotted against wheel ruts depth from manual measurement at the control object.

Regressionsanalys av manuell mätning och 120 meters fjärrmätning visade ett positivt linjärt samband, en korrelationskoefficient på 0,9879, $R^2 = 0,99$ och ett standardfel på 2,5 (figur 13).



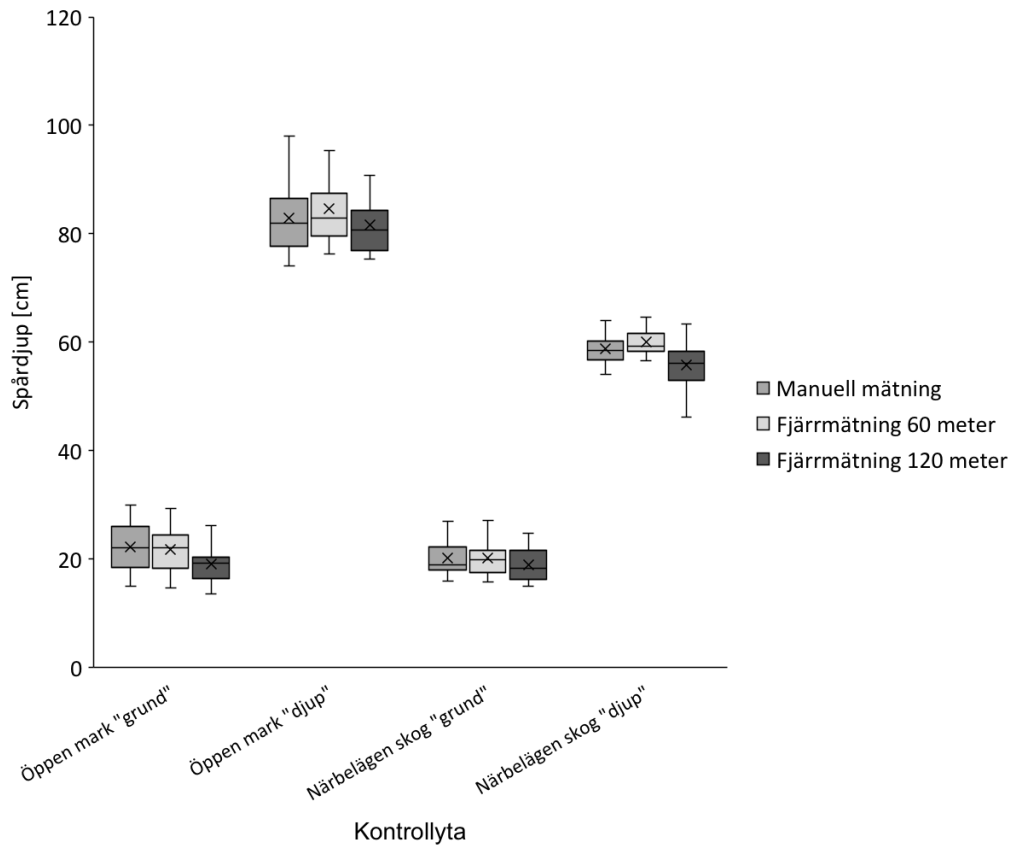
Figur 13. Spårdjup vid fjärrmätning från 120 m höjd plottat mot spårdjup vid manuell mätning på kontrollobjektet.

Figure 13. Wheel ruts depth for remote measurement from a height of 120 m plotted against wheel ruts depth from manual measurement at the control object.

Det fanns inga statistiskt signifikanta skillnader (p-värde = 0,622) för hur mätmetoderna mäter spårdjupet beroende av provytans läge resp. spårdjup (öppen mark eller nära skog resp. grund eller djup) på kontrollobjektet. Således fanns det ingen interaktionseffekt och resultatet från mätmetoderna beror inte på skillnader mellan provytornas läge resp. spårdjup.

Mätningarna från kontrollobjektet uppdelat i respektive provyta visade inga statistiskt signifikanta skillnader för medelvärden av mätt spårdjup mellan manuell mätning och fjärrmätning 60 meter (p-värde = 0,705). Mellan manuell mätning och fjärrmätning 120 meter fanns en statistiskt signifikant skillnad (p-värde = 0,001) (figur 14). Resultatet visade ett litet spridningsintervall av data för de olika metoderna (figur 14).

Medelvärdena för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och fjärrmätning 120 m var för kontrollytan "Öppen mark "grund"" 22 cm, 22 cm och 19 cm, "Öppen mark "djup"" 83 cm, 85 cm, 82 cm, "Närbelägen skog "grund"" 20 cm, 20 cm och 19 cm och "Närbelägen skog "djup"" 59 cm, 60 cm och 56 cm (figur 14).



Figur 14. Mätt medelspårdjup, inklusive median och spridningsintervall, för manuell mätning, fjärrmätning 60 m och 120 m vid kontrollobjektet uppdelat per kontrolllyta. För kontrolllytorna "Närbelägen skog "grund"" och "Närbelägen skog "djup"" var minsta avståndet mellan kontrolllytan och skogen (medelhöjd 20 m) 3,1 m respektive 4,7 m.

Figure 14. Estimated mean of wheel ruts depth, including median and spreading range, for manual measurement, remote measurement 60 m and 120 m at control object divided into control areas. For the control areas "Near forest "shallow"" and "Near forest "deep"" the shortest distance between the control area and the forest (average height 20 m) was 3.1 m and 4.7 m.

Mätningar av spårdjup mellan manuell mätning och fjärrmätning från 60 meter uppdelat i respektive provyta visade inga statistiskt signifikanta skillnader (p -värde = 0,705). Mätningar av spårdjup mellan manuell mätning och fjärrmätning från 120 meter uppdelat i respektive provyta visade statistiskt signifikanta skillnader (p -värde = 0,001) (tabell 3). Medelvärde av skillnaden mellan manuell mätning och fjärrmätning 120 meter var -2,2 cm, variationen var mellan -3,6 cm till -0,8 cm med konfidsgraden 95%.

Tabell 3. Spår djup på kontrollobjekt uppdelat i mätmetod och kontrolltyta 1. Öppen mark "grund", 2. Öppen mark "djup", 3. Närbelägen skog "grund" och 4. Närbelägen skog "djup". Inga statistisk signifikanta skillnader (p -värde $\geq 0,705$) fanns mellan manuell mätning (MAN) och fjärrmätning 60 m (F60). Mellan manuell mätning och fjärrmätning 120 m (F120) fanns en statistiskt signifikant skillnad (p -värde $= 0,001$)

Table 3. Wheel ruts depth at control object divided into measurement method and control area 1. Open field "shallow", 2. Open field "deep", 3. Near-forest "shallow" and 4. Near-forest "deep". No statistical significant differences (p -value $\geq 0,705$) existed between manual measurement (MAN) and remote measurement 60m (F60).

Between manual measurement and remote measurement 120 m (F120) there was a statistically significant difference (p -value $= 0,001$)

Kontrolltyta	1			2			3			4		
Mätmetod	MAN	F60	F120	MAN	F60	F120	MAN	F60	F120	MAN	F60	F120
Antal mätpunkter (N)	22	25	25	18	18	18	22	22	22	18	18	18
Medelvärde spår djup [cm]	22,2	21,7	19,0	82,9	84,6	81,7	20,2	20,1	18,9	58,8	60,0	55,8
Standardavvikelse	4,2	4,0	3,2	5,9	6,4	5,3	2,9	3,1	2,9	2,9	2,7	4,3
RMSE	1,7	3,9	2,2	2,5	1,4	1,9	1,5	4,5				

4 Diskussion

4.1 Fjärrmätning och manuell mätning

Fjärrmätning av spår djupet från 60 meter och 120 meter visade en likvärdig mätprecision och mätnoggrannhet i förhållande till den manuella mätningen (tabell 1, 2 och 3). För fältobjektet och kontrollobjektet visades totalt sett inga statistiskt signifikant skillnader mellan de olika mätmetoderna. Därför betraktas inventering av körskadors djup via fjärrmätning som en likvärdig metod i förhållande till manuell mätning när det gäller mätning av spår djup av flertalet hjulspår. När kontrollobjektets mätningar delades upp i respektive provyta fanns det en statistiskt signifikant skillnad mellan manuell mätning och fältmätning 120 meter (tabell 3). Det beror mest troligt på att spår djupet inom en enstaka provyta är mer jämnt, vilket gör att variationen inte är lika stor och således blir skillnader mellan mätmetoderna tydligare. Vid fältobjektet eftersträvades provytor med homogena hjulspår och vid kontrollobjektet skapades ett jämnt spår djup för kontrolllytorna. Trots det varierade mätprecisionen mellan 2,9-6,4 cm och mätnoggrannheten mellan 0-3 cm beroende av flyghöjd och försöksområde (tabell 1, 2 och 3). Spridningen av spår djupet resulterade i en högre standardavvikelse, vilket gör det svårare att säkerställa statistiskt signifikanta skillnader. Att fjärrmätningen totalt sett hade en så pass hög mätnoggrannheten att en standardavvikelse på 4,1 - 6,4 cm (8,9 - 22,1 %) inte gav statistiskt signifikans anses vara ett lyckat resultat (tabell 1, 2 och 3).

Fjärrmetodens resultat av mätt spår djup med hjälp av stereofotogrammetri och skapande av 3D-punktmoln, visade en mätnoggrannhet och mätprecision som även tidigare liknande studier har kunnat redovisa (Marra et al. 2018; Pierzchała et al. 2016). En liknande studie som jämförde resultatet från manuell mätning av hjulspår med stereofotogrammetrisk mätning på nära håll visade god matchning mellan mätningarna och ett RMSE mellan 2,07 och 3,84 cm för mätt spår djup (Pierzchała et al. 2016). Denna studie stödjer mitt resultat som för fältobjektet visade ett liknande RMSE mellan 4,4 och 5,2 cm beroende på flyghöjd och resultatet från kontrollobjektet visade ett RMSE mellan 1,7 och 3,3 cm beroende på flyghöjd (tabell 1 och 2).

En studie av Marra et al. (2018) har jämfört mätnoggrannheten för stereofotogrammetrisk mätning från 3 meters höjd med manuella mätningar av spår djupet. Studien styrker mitt resultat eftersom den totalt sett inte visade några statistiskt signifikant skillnader (p -värde $<0,05$) mellan mätresultaten från manuell mätning och fjärrmätning (Marra et al. 2018). I Marra et al. (2018) studie gjordes också en regressionsanalys mellan fjärr- och manuell mätning av spår profiler som gav en hög förklaringsgrad (R^2 0,92) och en korrelationskoefficient på 0,9976, vilket stämmer överens med mitt resultat nedan. Förklaringsgraden som visades i mina jämförelser var mellan manuell mätning och fjärrmätning 60 meter (R^2 0,83) resp. 120 meter (R^2 0,77) för fältobjekt och mellan manuell mätning och fjärrmätning 60 meter (R^2 0,99) resp. 120 meter (R^2 0,99) för kontrollobjektet (figur 8, 9, 12 och 13). Korrelationskoefficienterna från regressionsanalys i min studie var mellan 0,8571-0,9875. Resultat visar i enighet med Marra et al. (2018) studie att 77-99 % av variationen för den beroende variabeln (y) kan förklaras av variationer i den oberoende variabeln (x).

4.2 Fältobjekt och kontrollobjekt

Resultatet från kontrollobjektet visade en jämnare spridning på medelvärden för mått spårdjup mellan de olika mätmetoderna (figur 14) jämfört med fältobjektet (figur 10). Förklaringen till resultatet är att skillnader i positioneringen av mätpunkten har mindre inverkan på resultatet när det är en homogen marknivå utan störande objekt som exempelvis stenar, stubbar och GROT (figur 6, 19 och 20).

Avvikelser i medelvärdena mellan mätmetoderna beror till stor del på att exakt samma mätpunkter inte kunde erhållas mellan mätningarna. Eftersom inte samma mätpunkter kunde garanteras mellan de olika mätmetoderna var det svårt att detaljerat jämföra mått spårdjup för fältobjektet på grund av en relativt hög spridning inom mätdata. En ojämn marknivå och stundtals hög förekomst av GROT bidrog till enstaka större avvikelser mellan mätningarna (figur 2, 3, 4 17 och 18). Därav finns det en större spridning och lägre förklaringsgrad för data och sambanden i figur 8 och figur 9. Spridningen inom mätdata resulterar i en högre standardavvikelse, vilket ger svårigheter att säkerställa statistiskt signifikanta skillnader eftersom mätnoggrannheten för fjärrmätningen var högre än standardavvikelsen (tabell 1, 2 och 3).

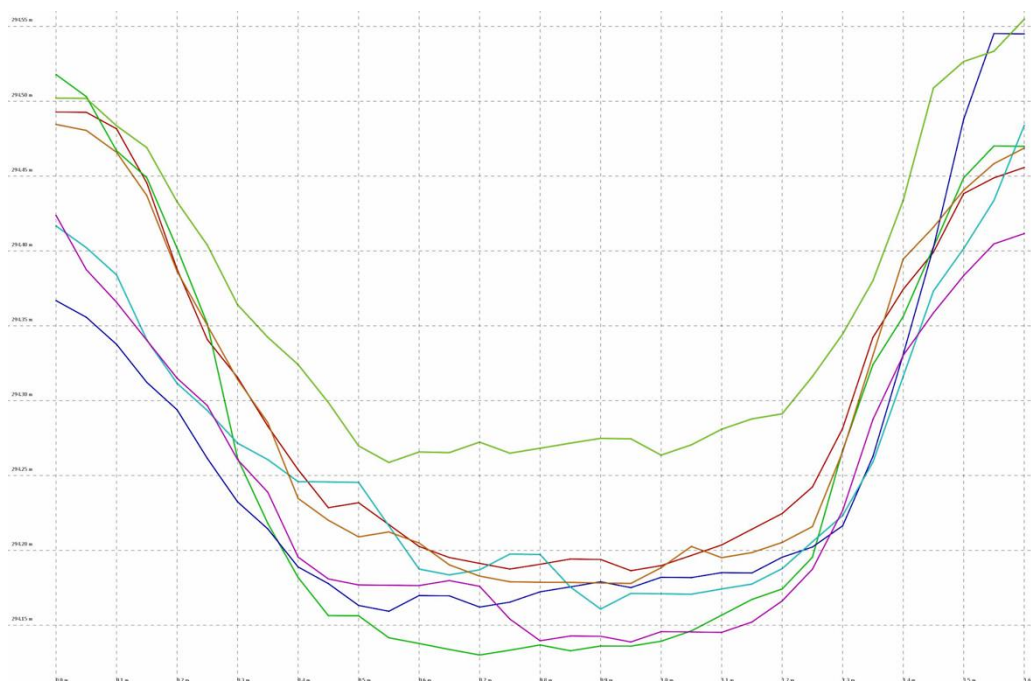
Jämförs istället mätmetoderna för kontrolllytorna där omgivande förhållanden var mer konstanta (figur 6, 19 och 20), visar regressionsanalysen en mycket hög förklaringsgrad och riktningskoefficient nära 1 (figur 12 och 13). Fjärrmätningen mäter troligtvis spårdjupet vid fältobjekt respektive kontrollobjektet med samma noggrannhet och precision. Det mest rättvisa resultatet av mätnoggrannhet och mätprecision för mätmetoderna erhålls därmed från kontrolllytorna (figur 12 och 13).

Data presenteras utan justering av extremvärden, något som också bidrar till en lägre förklaringsgrad (figur 8, 9, 12 och 13) och lite större avvikelser mellan medelvärden för mått spårdjup.

En mer detaljerad mätning av spårdjupet jämfört med manuella metoder kan skapas genom en totalinventering av hjulspårets djup i ett 3D-punktmoln. Det kan exempelvis genomföras via volymsberäkning av hjulspåret i Agisoft Photoscan eller Quick Terrain Modeler. Att mätningar i ett 3D-punktmoln kan erhålla mer detaljerad data av hjulspåren jämfört med manuella metoder är något som styrks av flertalet andra studier (Giannetti et al. 2017; Koren et al. 2015; Pierzchała et al. 2014, 2016; Cambi et al. 2018; Haas et al. 2016). Att automatiskt generera en volymsberäkning av hjulspåret hade även bidragit till en effektivare process. Ett tidskrävande moment för fjärrmätningen var att manuellt mäta spårdjupet med ett bestämt intervall i programmet Quick Terrain Modeler. Beräkning av spårvolymen ger också en bättre uppskattning av hjulspårets omfattning eftersom spårets bredd också mäts (Marra et al. 2018).

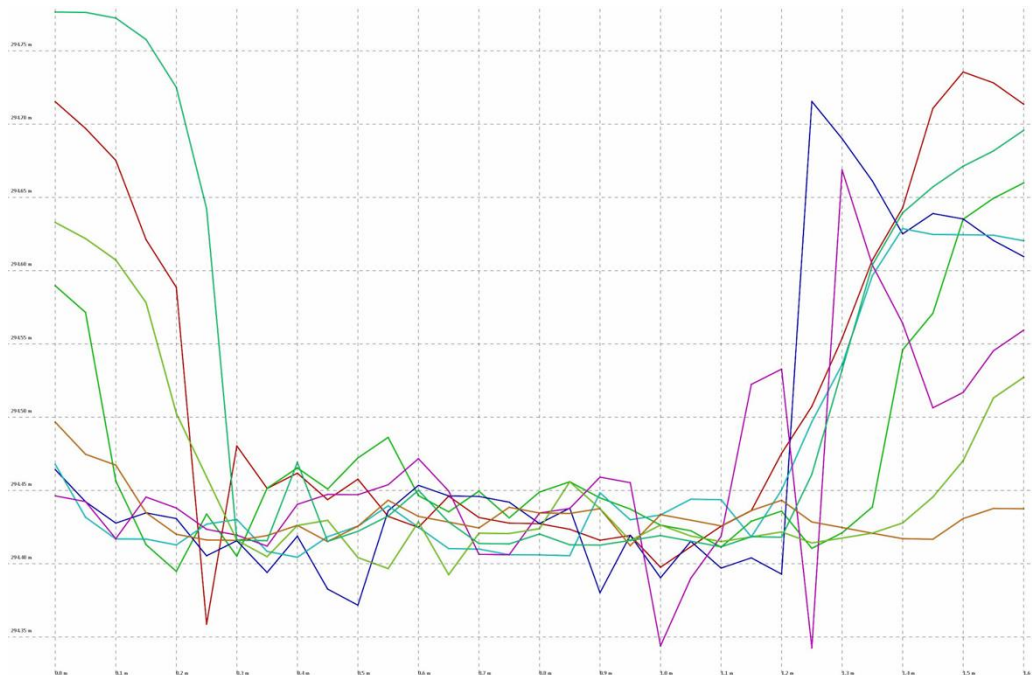
Resultatet från fältobjektets fjärrmätning visade för enstaka provytor en mätavvikelse av spårdjupet med över 15 procent (cirka 5 cm) jämfört med manuell mätning (Bilaga 2). En granskning av dessa provytors mätpunkter indikerar att övervägande antalet provytor innehöll enstaka mätpunkter med antingen mycket ojämn marknivå (breda hjulspår, stubbar omkring 25 cm eller gräs- och risvegetation med en höjd av 10-20 cm) (figur 2, 3, 4, 17 och 18). Objekten registrerades under manuell mätning vid dess mätpunkter och eftersom fjärrmätningen inte utfördes på exakt samma position kan höjdskillnaden vara stor på grund av detta, vilket är en förklaring till avvikelserna.

För vattenfyllda hjulspår fanns en hypotes om att det var svårt att mäta korrekt avstånd mellan markyta och vattenyta. Eftersom vattenytan är blank och reflekterar olika beroende på observationsvinkel blir det svårt för algoritmerna att hitta korrekt matchande objekt över vattenytan (figur 4). Denna hypotes kunde bekräftas av mitt resultat. I 3D-punktmolnet kunde fenomenet ibland observeras som ett brus av punkter ovanför och under befintlig vattenyta. Speciellt tydligt var det inom fältobjektets 3D-punktmoln skapad från 60 meter flygfotografering (figur 17) där densiteten av punkter var högre. Bruset av punkter förekom även i 3D-punktmolnet skapat från 120 meter flygfotografering (figur 18), men var inte lika påtagligt. Fenomenet kan vara en förklaring till att enstaka provtytor hade lägre mätprecision och större spridning av mätdata vid fjärrmätning (figur 11). Fenomenet var också tydligt vid skapande av hjulspårets tvärsnittsp profiler inom 3D-punktmolnen. Tvärsnittsp profilens botten av hjulspåret var vid vattenfyllda hjulspår ojämn i jämförelse med tvärsnittsp profiler av ej vattenfyllda hjulspår (figur 15 och 16).



Figur 15. Tvärsnittsp profiler (7 st) av ett hjulspår (spår djup ~ 25 cm) från fältobjektet med jämn spår botten. Mätningarna är från ett 3D-punktmoln skapat från 60 m flygfotografering.

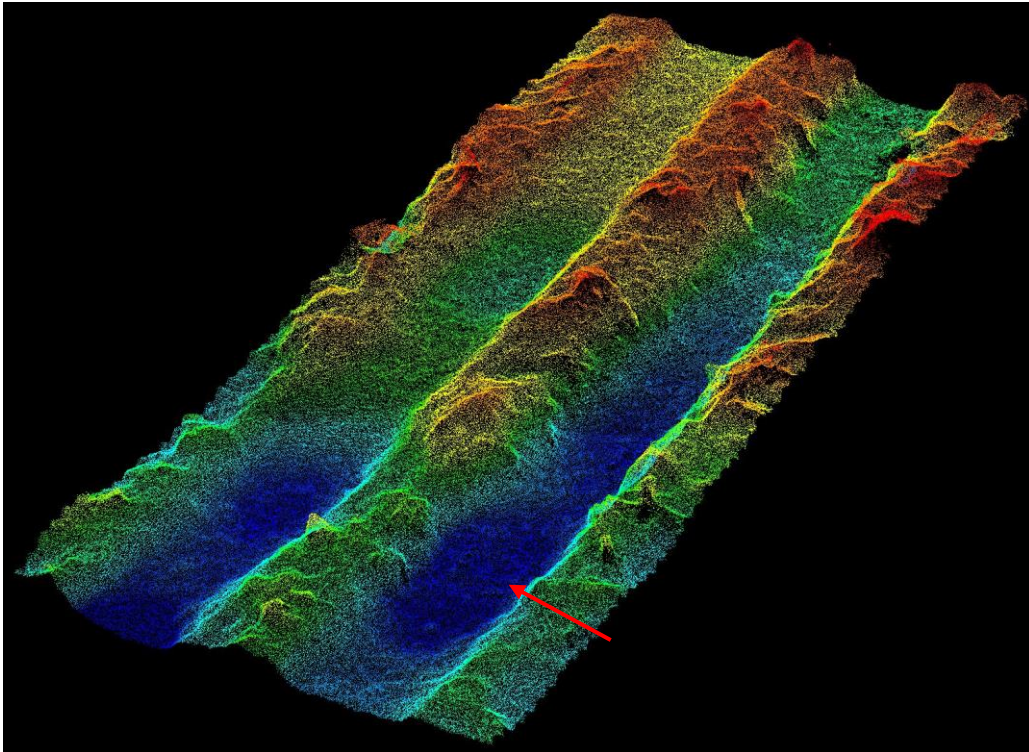
Figure 15. Cross-section profiles (7 pcs) of a wheel rut (wheel rut depth ~ 25 cm) from the field object with even bottom. The measurements are from a 3D point cloud created from 60 m aerial photography.



Figur 16. Tvärsnittsprofiler (8 st) av ett hjulspår (avstånd mellan marknivå och vattenyta ~ 35 cm) från fältobjektet med ojämn spårbotten (± 10 cm). Mätningarna är från ett 3D-punktmoln skapat från 60 m flygfotografering.

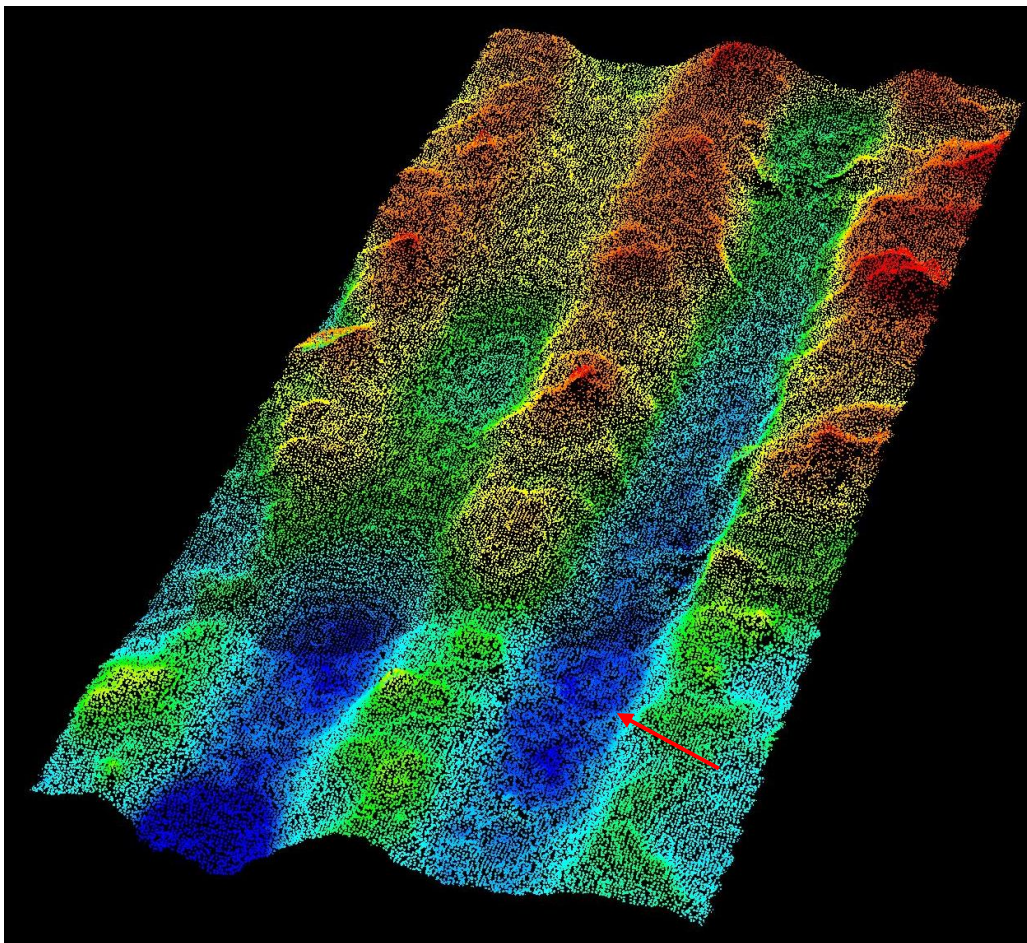
Figure 16. Cross-section profiles (8 pcs) of a wheel rut (distance between ground level and water surface ~ 35 cm) from the field object with uneven bottom (± 10 cm). The measurements are from a 3D point cloud created from 60 m aerial photography.

Figurer 17 och 18 visar en och samma provyta från 3D-punktmolnet skapat från 60 eller 120 meters flygfotografering på fältobjektet. Höger hjulspår var djupare (~ 30 cm) och vänster hjulspår var grundare (~ 20cm). Nedre delen av hjulspåret var relativt homogent med jämn marknivå, medan övre delen var mer heterogent med relativt ojämn marknivå. Den lägre flyghöjden gav ett mer detaljerat punktmoln med högre densitet av punkter (figur 17). Det förekom ett visst brus i punktmolnet på grund av en vattenfylld grop. Fenomenet visades vara svårt att se ovanifrån men var beläget vid den röda pilen (figur 17).



Figur 17. 3D-punktmoln av hjulspår skapat från 60 m flygfotografering på fältobjekt. Den röda pilen visar en vattenfylld grop med visst brus i 3D-punktmolnet. Topografiskt färgsättning (Rött = höga värden och blått = låga värden).

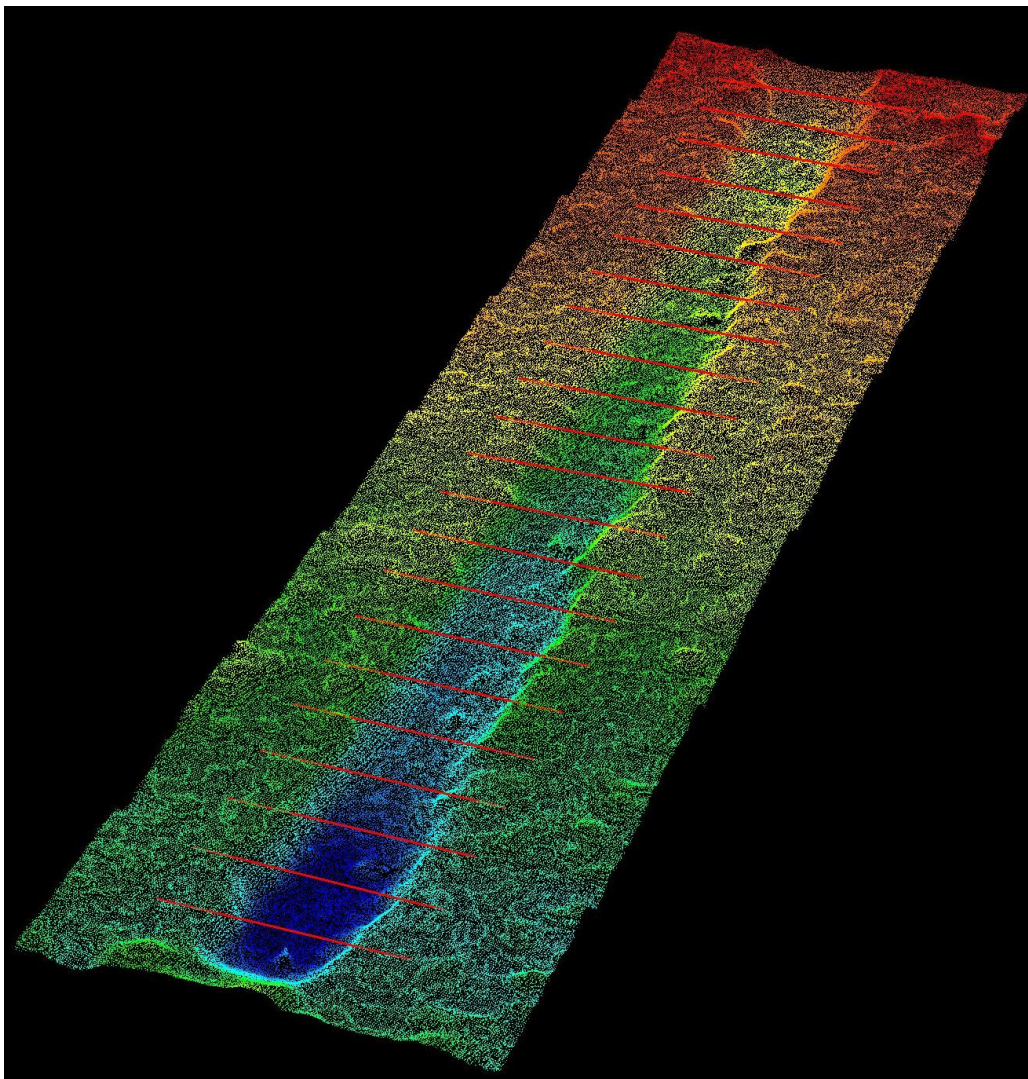
Figure 17. 3D point cloud of wheel ruts created from 60 m aerial photography at field object. The red arrow indicates a water-filled pit with some noise in the 3D point cloud. Topographic color scheme (Red = high values and blue = low values).



Figur 18. 3D-punktmoln av hjulspår skapat från 120 m flygfotografering på fältobjekt. Den röda pilen visar en vattenfylld grop med visst brus i 3D-punktmolnet. Topografiskt färgsättning (Rött = höga värden och blått = låga värden).

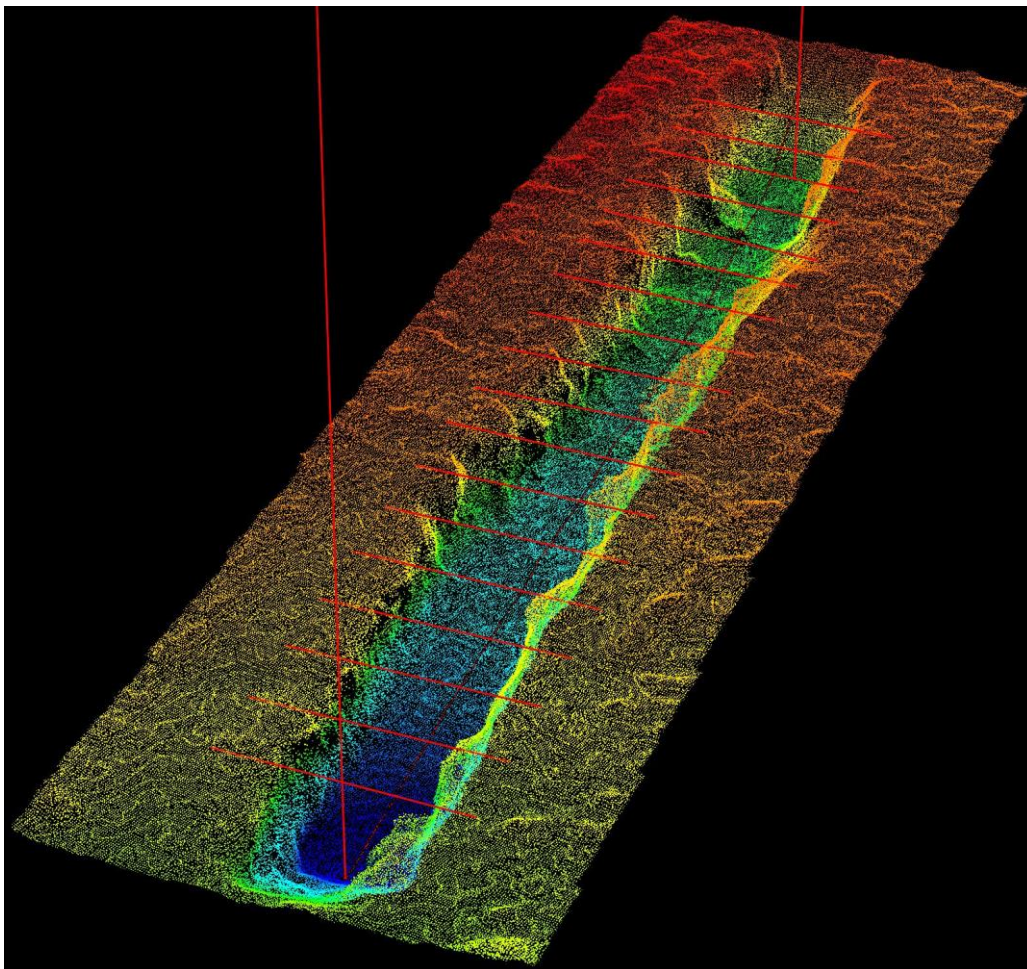
Figure 18. 3D point cloud of wheel ruts created from 120 m aerial photography at field object. The red arrow indicates a water-filled pit with some noise in the 3D point cloud. Topographic color scheme (Red = high values and blue = low values).

Flygfotograferingen på kontrollobjektet från 60 meters flyghöjd resulterade i ett 3D-punktmoln med mycket hög detaljnivå och densitet med punkter av markstrukturen för både grunda och djupa spår (figur 19 och 20).



Figur 19. 3D-punktmoln från 60 m flygfotografering över kontrollyta 3. Närbelägen skog "grund". De röda linjerna är tvärsnittsmarkeringar från "Cross sections generation"-verktyget vilket markerar intervallet för mätpunkter. Topografiskt färgsättning (Rött = höga värden och blått = låga värden).

Figure 19. 3D point cloud from 60 m aerial photography over control area 3. Near forest "shallow". The red lines are cross-sectional markings from the "Cross sections generation" tool, which marks the interval for measuring points. Topographic color scheme (Red = high values and blue = low values).



Figur 20. 3D-punktmoln från 60 m flygfotografering över kontrollyta 4. Närbelägen skog "djup". De röda linjerna är tvärsnittsmarkeringar från "Cross sections generation"-verktyget vilket markerar intervallet för mätpunkter. Topografiskt färgsättning (Rött = höga värden och blått = låga värden).

Figure 20. 3D point cloud from 60 m aerial photography over control area 3. Near forest "deep". The red lines are cross-sectional markings from the "Cross sections generation" tool, which marks the interval for measuring points. Topographic color scheme (Red = high values and blue = low values).

4.3 Felkällor

Vid manuell mätning av spårddjup vid fältobjektet var spårddjupsmätaren ibland inte tillräckligt bred för aktuellt hjulspår. Det medförde att enstaka mätningar utfördes en bit ner på insidan av hjulspåret och inte i förhållande till korrekt marknivå. Det bidrar till en underskattning av spårddjupet inom vissa provytor i förhållande till fjärrmätningen.

Fältobjektets provytor var heterogena gällande spårddjup, spårbredd, markvegetation, marknivå och omfattning av GROT varierade (figur 2, 3, 4, 17 och 18). Förhållandena medförde svårigheter för den manuella mätningen, då spårddjupsmätaren inte alltid hade kontakt med korrekt marknivå. Ibland hamnade mätpunkten för marknivå vid manuell mätning på en höjd (trädstubbe, jordhög eller sten) vilket bidrar till en överskattning av spårddjupet. På grund av detta ska den manuella mätningen inte betraktas som det sanna värdet för spårddjupet.

För fältobjektet genomfördes den manuella mätningen av spårdjupet ett dygn senare jämfört med flygfotograferingen. Under detta dygn var det ingen nederbörd, men en del av det befintliga vattnet i hjulspåren kan ha minskat via evaporation (figur 2, 3 och 4). Vid mätning av spårdjupet för hjulspår innehållande vatten kan det bidra till en redan befintlig skillnad mellan mätmetoderna. Vid granskning av vattennivån i hjulspåren har däremot ingen större skillnad upptäckts mellan de olika mätmetoderna.

4.4 Fjärrmätningens fördelar och nackdelar jämfört med manuell mätning

Följande fördelar finns med fjärrmätning:

- Det är lättare att upptäcka alla körskador på en trakt med en överblick från en flyghöjd på 60 eller 120 meter.
- Aktuella flygbilder erhålls och i efterhand kan fler mätningar göras.
- Flygbilderna kan sparas som dokumentation på utfört arbete och i framtiden enkelt styrka eller avvisa påstående om brister.
- Flygbilderna eller 3D-punktmolnet blir ett mervärde som kan bifogas till berörd markägare eller användas i utbildningssyfte.
- Enkelt och tidseffektivt att samla in data med drönare.
- Kunskapsläget inom fjärranalys har en snabb utveckling och kommer mest troligt bli ännu effektivare i framtiden.

Följande nackdelar finns med fjärrmätning:

- Flygningen kan vanligtvis inte genomföras under regn, snöfall eller starka vindar (>10 m/s).
- Hög kostnad för att köpa drönaren.
- Behov av dyr programvara till databearbetningen.
- Kan inte mäta spårdjupet vid vattenfyllda hjulspår.

4.5 Praktisk tillämpning och utveckling

Eftersom inga statistiskt signifikant skillnader visades totalt sett mellan de olika mätmetoderna betraktas fjärrmätning av körskadors djup som en mycket lovande metod. Fjärrmätning kan användas i framtida inventering av föryngringsavverkade objekt eller för inventering av natur- och kulturhänsyn där omfattningen av markskador ingår. Genom skapande av ett tätt 3D-punktmoln från 80/80 överlappande flygbilder kan dessutom intressanta objekt ur miljö- och kulturhänsyn perspektiv visas. Exempel på intressanta objekt kan vara antalet högstubbar, kulturstubbar, stenmurar och kvarlämnade träd. Det är dessutom lättare att upptäcka och övergripande se konturer och former av kultur- och fornlämningar via fjärranalys jämfört med traditionell manuell inventering.

Jämfört med manuell inventering erhålls en betydligt bättre överblick av trakten från 60 respektive 120 meters höjd, vilket gör det lättare att upptäcka alla markskador. Det finns möjlighet att flyga högre än 120 meter och utom synhåll med drönare om drönarpiloten har tillstånd från transportstyrelsen. Nackdelar med en högre flyghöjd är ökat GSD, kraftigare vindar, högre risk för hindrande moln, samt en mer tidskrävande start och landning. Under flygfotograferingen med drönare är ett tids- och effektkrävande moment att uppnå rätt flyghöjd vid start och därefter landning från samma höjd. För att spara tid och drönarens batteriladdning är det därför viktigt att inte flyga högre än vad som är nödvändigt vid flygfotograferingen. Fördelar med högre

flyghöjd är att färre flygstråk och flygbilder krävs för att flygfotografera ett område med bevarat överlapp mellan flygbilderna. Färre flygstråk resulterar till kortare flygsträcka och att ett större område kan inventeras inom drönarens begränsade batteritid. För en optimal flygplanering krävs därför avvägningar mellan flyghöjd och antalet flygstråk.

Vid genomförandet studien utplacerades GCP:er innan flygfotografering och sammantaget var det en relativt tidskrävande process att markera ut dem i fält och i flygbilderna. Om inte avsikten är att skapa ett 3D-punktmoln med exakt positionering i ett koordinatsystem, kan mätning av höjdförhållanden genomföras inom 3D-punktmolnets egna dimension, oberoende av punkternas positionering i omvärlden (Turner et al. 2012). För att effektivisera metoden vid praktisk tillämpning i framtiden kan därför positionering av GCP:er troligtvis uteslutas med bibehållet resultat för mätprecisionen och mätnoggrannheten.

Efter en genomförd fjärranalys av trakten skapas ett mervärde i form av aktuella flygbilder eller 3D-punktmoln som kan bifogas till markägare som ett intressant resultat ihop med kvittot från avverkningen. Flygbilderna eller 3D-punktmolnet kan dessutom bifogas till berörda entreprenörer, vilket öppnar upp för en diskussion gällande eventuella svagheter och styrkor i genomförandet av avverkningen. På sikt bidrar det till effektivare och ytterligare professionella maskinförare som tar kloka beslut.

Eftersom datainsamling via flygfotografering inte är en lika tidskrävande process som den manuella datainsamlingen, kan data samlas in från flera olika trakter under samma arbetsdag. Det bidrar till att en optimal körrutt kan skapas och på så vis minimera förflyttningskostnaden, miljöpåverkan från transporten och den ineffektiva tiden i bilen. Flygfotografering kan genomföras under ljusa delar av dygnet då vädret är gynnsamt, därefter kan databearbetning och mätningar göras inomhus.

Under genomförandet av metoden med fjärrmätning var ett tidskrävande moment att mäta hjulspårets djup med ett bestämt intervall i programmet Quick Terrain Modeler. Att utföra volymsberäkning av hjulspåret, istället för punktmätning med bestämt intervall, i programmet Agisoft Photoscan eller Quick Terrain Modeler, hade kunna bidra till ett mer tidseffektivt genomförande. Vidare undersökning krävs för att ge svar på hur det hade påverkat resultatet.

Det behövs en tidsstudie av total tidsåtgång för manuell mätning, fjärrmätning med mätpunkter vid bestämt avståndintervall och fjärrmätning med volymsberäkning av hjulspåren. En sådan studie kan användas som underlag för jämförelser hur total inventeringskostnad varierar mellan de olika mätmetoderna.

4.6 Slutsats

Fjärrmätning av spår djupet från 60 och 120 meter visar en likvärdig mätprecision och mätnoggrannhet i förhållande till den manuella mätningen. Inga statistiskt signifikant skillnader kunde totalt sett visas mellan de olika mätmetoderna. Delades mätningar av spår djup upp i kontrollobjektets respektive provytor visades däremot en statistiskt signifikant skillnad mellan manuell mätning och fjärrmätning 120 meter. Vid den statistiskt signifikanta skillnaden mellan manuell mätning och fjärrmätning från 120 m underskattade fjärrmätningen spår djupet i medel med 2,2 cm. Fjärrmätning med drönare betraktas som en likvärdig metod till manuell mätning när det gäller mätning av spår djup, men med begränsningen att metoden inte klarar att mäta korrekt spår djup om det finns vatten i hjulspåren. Fjärrmätningen visades även kunna utföra mätningar nära en skogskant (3,1 m) utan statistiskt signifikanta skillnader i resultatet. Det fanns inga statistiskt signifikanta skillnader mellan hur metoden fjärrmätning mäter spår djupet beroende av hjulspårets läge (öppen mark eller nära skog) resp. spår djup (grunt eller djupt) på kontrollobjektet. Fjärrmätningen mäter spår djupet med samma mätnoggrannhet oavsett spår djup, öppen mark eller med närbelägen skog.

Datamaterialet från fjärrmätningen skapar ett mervärde och resultatet från studien kan bidra till effektivisering och kostnadsbesparing vid praktiskt tillämpning inom skogsbruket. Detta arbete har resulterat i framtagande av en metod för drönarbaserad stereofotogrammetrisk spår djupsmätning som ger likvärdig precision och noggrannhet som manuella mätmetoder, vilket för skogsbruket innebär att ett skarpt verktyg skapats för effektiva och detaljerade uppföljningar av markpåverkan efter skogliga åtgärder.

Arbetet bör följas upp med ytterligare studier på hur volymsberäkning av hjulspåret kan påverka fjärrmätning-metodens resultat och hur total tidsåtgång och inventeringskostnad varierar mellan de olika mätmetoderna.

5 Referenser

- Bagheri, I., Naghdi, R. & Jalali, A. M. (2013). *Evaluation of factors affecting soil erosion along skid trails (case study; Shafarood Forest, Northern Iran)*. CJES. 11:151–160.
- Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. & Westoby, M. J. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Geomor-04105; 15 s.
- Bohlin, J. (2017). *Data collection of Forest Management Planning Using Stereo Photogrammetry*. Department of Forest Resource Management, SLU. Doctoral thesis No. 2017:109.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F. & Marchi, E. (2015). *The impact of heavy traffic on forest soils: a review*. *Forest Ecology and Management* 338:124–138.
- Cambi, M., Giannetti, F., Bottalico, F., Travaglini, D., Nordfjell, T., Chirici, G. & Marchi, E. (2018). *Estimating machine impact on strip roads via close-range photogrammetry and soil parameters: a case study in central Italy*. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 11:148-154.
- de Wit H. A., Granhus, A., Lindholm, M., Kainz M. J., Lin, Y. & Braaten, H. F. V. (2014). *Forest harvest effects on mercury in streams and biota in Norwegian boreal catchments*. *Forest Ecology and Management* 324:52–63.
- Eklöf, K., Schelker, J., Sørensen, R., Meili, M., Laudon, H. & von Brömssen, C. (2014). *Impact of forestry on total and methyl-mercury in surface waters: distinguishing effects of logging and site preparation*. *Environmental Science and Technology* 48:4690–4698.
- Eliasson, L. (2005). *Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction*. *Silva Fennica* 39:549–557.
- Eliasson, L. & Wästerlund, I. (2007). *Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil*. *Forest Ecology and Management* 252:118–123.
- Frey, B., Kremer, J., Lüscher, P., Rudt, A., Sciacca, S. & Matthies, D. (2009). *Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure*. *European Journal of Soil Biology* 45: 312–320.
- Giannetti, F., Chirici, G., Travaglini, D., Bottalico, F., Marchi, E. & Cambi, M. (2017). *Assessment of soil disturbance caused by forest operations by means of portable laser scanner and soil physical parameters*. *Soil Science Society of America* 81:1577–1585.
- Grigal, D. F. (2000). *Effects of extensive forest management on soil productivity*. *Forest Ecology and Management* 138:167–185.
- Haas, J., Hagge, K., Ellhoft, K. H. & Lang, F. (2016). *Using photogrammetry to assess rutting caused by a forwarder – a comparison of different tires and bogie tracks*. *Soil and Tillage Research* 163:14–20.
- James, M. R. & Robson, S. (2012). *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*. *Journal of Geophysical Research* 117: F03017, doi:10.1029/2011JF002289.
- Koren, M., Slancik, M., Suchomel, J. & Dubina, J. (2015). *Use of terrestrial laser scanning to evaluate the spatial distribution of soil disturbance by skidding operations*. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 8:386–393.
- Lotfalian, M. & Parsakhoo, A. (2009). *Investigation of forest soil disturbance caused by rubber-tired skidder traffic*. *International Journal of Natural Engineering Science* 3:79–82.
- Marra, E., Cambi, M., Fernandez-Lacruz, R., Giannetti, F., Marchi, E. & Nordfjell, T. (2018). *Photogrammetric estimation of wheel rut dimensions and soil compaction after increasing numbers of forwarder passes*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, doi: 10.1080/02827581.2018.1427789.
- Nadal-Romero, E., Revuelto, J., Errea, P. & López-Moreno, J. I. (2015). *The application of terrestrial laser scanner and SfM photogrammetry in measuring erosion and deposition processes in two opposite slopes in a humid badlands area (central Spanish Pyrenees)*. *Soil* 1: 561-573, doi:10.5194/soil-1-561-2015

- Petersson, U. (2009). *Öppet hus och nostalgi i Vidsel*. Protec. (Försvarets materialverk) Nr 2. Sid 27.
- Pierzchała, M., Talbot, B. & Astrup, R. (2016). *Measuring wheel ruts with close-range photogrammetry*. Forestry 89(4):383–391.
- Pierzchała, M., Talbot, B. & Astrup, R. (2014). *Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling*. Forests 5:1212–1223.
- Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E. & Certini, G. (2012). *Machinery induced soil compaction in thinning two pine stands in Central Italy*. Forest Ecology and Management 285:38–43.
- Soja, A. J., Tchebakova, N. M., French, N. H. F., Flannigan, M. D., Shugart, H. H., Stocks, B. J., Sukhinin, A. I., Parfenova, E. I., Chapin, F.S. & Stackhouse Jr, P. W. (2007). *Climate-induced boreal forest change: predictions versus current observations*. Global and Planetary Change 56:274–296.
- Sylvander, R. (1972). *Skoglig datainsamling från flygplan: Collection of forest data from slow-flying aircraft*. Sveriges lantbruksuniversitet, Avdelningen för skogsuppskattning och skogsindelning. Rapporter och Uppsatser. Nr 1. Umeå.
- Sylvander, R. (1979). *Inventering av stormskador på skog i flygbilder*. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för biometri och skogsindelning. Umeå.
- Transportstyrelsen. (2017). *Transportstyrelsens författningssamling – Transportstyrelsens föreskrifter om obemannade luftfartyg*. TSFS 2017:110.
- Turner, D., Lucieer, A. & Watson, C. (2012). *An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure From Motion (SfM) Point Clouds*. Remote Sensing, 4, 1392–1410, doi: 10.3390/rs4051392.
- Venanzi, R., Picchio, R. & Piovesan, G. (2016). *Silvicultural and logging impact on soil characteristics in Chestnut (Castanea sativa Mill.) Mediterranean coppice*. Ecological Engineering 92: 82–89.
- Warner, W. (1995). *Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography*. Soil and Tillage Research 34:187–197.
- Öhman, M. & Asplund, V. (2015). *Inventering och drivningsplanering av stormskadad skog med hjälp av drönare (UAV)*. SLU, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi. Opublicerat manus.
- Öhman, M. & Edlund, B. (2015). *UAV som verktyg vid traktplanering av stormfälld skog i norra Sverige*. SLU, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi. Opublicerat manus.

Elektroniska referenser

- Luftfartsverket. (2018). Karta för obemannade luftfartyg. <https://daim.lfv.se/echarts/dronechart/> 2018-09-13.
- Lykke-Olesen, T. (2017). *Flygande dödsmaskiner: 150 med drönare i krig*. Världens Historia. <https://varldenshistoria.se/om-varldenshistoriase/prenumeration/flygande-dodsmaskiner-150-ar-med-dronare-i-krig> 2018-09-13.
- NetOnNet. (2018). Prisuppgift för drönaren Phantom 4 Pro v2.0 https://www.netonnet.se/art/hem-hushall/leksaker-hobby/dronare/dji-phantom-4-pro-v2-0/1004274.11726/?gclid=CjwKCAjwlejcBRAdEiwAAbj6KVwKX8P6EjP-vJoHPivaJh43MOn3Uh_KaaAodQ9L7362a6LFq9-cjRoClc0QAvD_BwE 2018-09-13.
- Transportstyrelsen. (2018). Nya regler för drönare. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/Luftfartyg-och-luftvardighet/Obemannade-luftfartyg-UAS/nya-regler-for-dronare/> 2018-09-13.

Bilagor

Bilaga 1. Detaljerad information om material för fjärrmätning.

Material för fjärrmätning var:

- Bärbar dator för fältarbete.
- RTK-GPS.
- Sprayfärg.
- Drönare.
- Dator för databearbetning (Specifikationer: Operativsystem: Windows 7 Enterprise 64-bit, Grafikkort: Nvidia GeForce GTX780Ti, Processor: Inter Core i7-4820K och RAM: 64 GB).
- Programvaror: Pix4Dcapture (version 4.0.0, Agisoft Photoscan Professional (version 1.4.4) och QuickTerrain Modeler (version 8.0.7.0).

Drönarens specifikationer var följande:

- Modell: DJI Phantom 4 pro.
- Maximal hastighet: S-mode: 72 km/h, A-mode: 58 km/h, P-mode: 50 km/h.
- Maximal vind-resistans: 10 m/s.
- Flygtid: Max 30 minuter/batteri.
- Antal batterier: 8 stycken (15,2 V, 5870 mAh).
- Satellit positions-system: GPS/GLONASS.

Specifikationer för integrerad kamera var följande:

- GIMBAL: Pitch 90° to +30° +- 0,02°.
- Passiv RGB-reflex kamera.
- Kameramodell: FC6310 (8,8 mm)
- Bildupplösning: 20 megapixlar.
- Pixelstorlek: 2,41x2,41 µm.
- Focal-längd: 8,8 mm
- Bildstorlek: 5472x3648.

Bilaga 2. Detaljerat resultat från fältobjektets mätning av spårddjup.

Tabell X1. Spårddjup på fältobjekt uppdelat i mätmetod, provyta och höger (H) och vänster (V) hjulspår
Table X1. Wheel ruts depth measurements at field object divided into measurement method, sample area and right (H) and left (V) wheel tracks

	Manuellt		60m flygning			120m flygning		
	Medelvärde spårddjup [cm]	Standardavvikelse	Medelvärde spårddjup [cm]	Standardavvikelse	RMSE	Medelvärde spårddjup [cm]	Standardavvikelse	RMSE
Provyta								
1H	25	4,8	26	8,7	4,2	24	5,9	2,7
1V	29	3,4	29	3,2	0,9	28	3,4	2,3
2H	24	5,6	24	6,3	4,0	24	4,0	4,1
2V	24	6,2	29	5,7	6,6	25	4,2	5,1
3H	26	2,3	32	3,0	6,9	29	3,4	4,0
3V	18	3,2	25	5,2	7,1	23	4,1	5,2
4H	26	7,0	24	5,6	4,3	23	4,6	7,4
4V	24	7,4	29	6,0	6,2	22	9,0	7,0
5H	16	8,5	16	9,2	4,1	14	7,1	3,0
5V	32	8,0	32	4,1	5,8	27	6,7	6,1
6H	34	7,2	32	8,1	4,4	34	6,4	4,2
6V	38	5,1	38	6,9	3,5	37	9,6	6,6
7H	35	10,1	36	8,9	3,7	32	7,7	6,5
7V	24	8,2	24	6,3	3,0	17	6,4	8,7
8H	22	5,9	23	5,1	3,4	22	5,5	2,4
8V	20	5,5	23	6,3	3,4	20	6,2	2,6
9H	32	3,6	32	3,0	1,5	30	2,9	4,2
9V	36	4,9	35	6,5	3,8	34	6,7	4,7
10H	30	5,8	34	8,2	6,1	32	7,9	5,6
10V	20	4,2	19	4,8	2,6	19	5,2	3,0
11H	27	6,3	25	5,2	2,8	25	5,8	2,9
11V	36	9,7	38	9,5	2,7	37	6,8	4,0
12H	38	6,0	38	6,0	4,0	37	6,7	4,6
12V	27	6,7	28	8,3	4,0	29	7,6	6,7
13H	23	4,0	23	5,6	3,6	22	3,9	3,1
13V	35	4,9	35	6,8	6,0	34	7,0	5,8
14H	27	3,3	26	3,7	1,9	24	3,6	2,9
14V	29	6,4	32	5,5	5,3	31	8,2	5,3
15H	14	4,4	19	2,7	6,6	19	4,4	7,0
15V	26	7,6	26	7,4	2,1	24	6,5	3,2
16H	47	5,7	51	5,2	6,0	51	5,5	6,8

16V	44	8,4	40	9,8	7,7	42	8,7	5,8
17H	45	7,4	45	7,2	2,5	40	7,6	7,0
17V	49	7,2	43	7,0	9,0	41	7,2	9,7
18H	22	9,5	23	9,9	5,8	19	10,2	5,4
18V	20	5,3	20	5,6	4,8	16	6,3	5,2
19H	44	6,3	46	6,9	4,5	44	7,2	3,5
19V	44	7,3	46	6,7	4,1	42	8,3	8,6
20H	26	5,9	26	5,2	2,9	20	8,7	8,4
20V	32	5,3	32	6,5	5,1	27	7,1	7,5
